

SISTEMA DE TANQUES MULTIVARIABLE



Miguel Alejandro Vélez Giraldo

William Humberto Cuellar Sánchez

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Departamento de Ingeniería Física
Ingeniería en Automática Industrial
Ingeniería Física
Popayán, Septiembre de 2011

SISTEMA DE TANQUES MULTIVARIABLE

Miguel Alejandro Vélez Giraldo

William Humberto Cuellar Sánchez

**Documento Final de Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero en
Automática Industrial e Ingeniero Físico**

Director: Ing. Jaime Díaz

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Departamento de Ingeniería Física
Ingeniería en Automática Industrial
Ingeniería Física

Popayán, Septiembre de 2011

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCION	1
2	MODELADO DEL ESQUEMA BASICO DE LA PLANTA	3
2.1	DESCRIPCION Y FUNCIONAMIENTO DEL ESQUEMA BASICO DE LA PLANTA	3
2.2	MODELO MATEMATICO DE LA PLANTA.....	4
	MODELO MATEMATICO DE UN TANQUE DE AREA VARIABLE	7
	MODELO MATEMATICO DE LOS CUATRO TANQUES.....	9
2.3	MODELO DE SIMULACIÓN DE LA PLANTA	11
2.4	ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA.....	14
3	DISEÑO FÍSICO DE LA PLANTA	15
3.1	DESCRIPCION DE LA PLANTA	15
3.2	DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DE LA PLANTA	188
3.3	DESCRIPCION DETALLADA DE LOS INSTRUMENTOS LA PLANTA	20
3.3.1.	INSTRUMENTOS DE CAMPO	20
	TANQUES DE ALMACENAMIENTO	21
	MOTOBOMBAS.....	22
	SENSORES DE FLUJO.....	23
	TRANSMISOR DE FLUJO.....	23
	ELECTROVÁLVULAS.....	24
	VÁLVULAS MANUALES.....	24
3.3.2.	INSTRUMENTOS DEL TABLERO DE CONTROL	25
	VARIADORES DE VELOCIDAD POWERFLEX 4M	25
	DAQ (TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS)	26
	RELEVOS ELETROMECÁNICOS Y DE ESTADO SÓLIDO.....	27
	LLAVE SELECTORA	28
	LUCES PILOTO.....	29
	FUENTE DE 24V	29
3.4	DOCUMENTANCION	30
3.4.1.	PLANO DE DIAGRAMA DE FLUJO Y ETIQUETADO	33
3.4.3.	PLANOS TIPICOS DE CABLEADO.....	34

3.5 OBTENCION DE LOS PARAMETROS DE LOS CUATRO TANQUES Y DEL COEFICIENTE DEL DIVISOR DE FLUJO	35
3.6 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LOS CUATRO TANQUES.....	38
3.7 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA FÍSICA.....	41
3.8 COMPARACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LOS CUATRO TANQUES CON EL COMPORTAMIENTO REAL DE LA PLANTA	443
CONCLUSIONES	46
RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	47
BIBLIOGRAFIA	48

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema básico de la planta de tanques multivariable	3
Figura 2. Tanque de área constante	5
Figura 3. Tanque de área variable	7
Figura 4. Vista frontal del tanque de área variable.....	8
Figura 5. Diagrama de bloques – Planta multivariable	11
Figura 6. Diagrama de bloques – Modelo de la planta.....	12
Figura 7. Diagrama de bloques – Modelo matemático de un tanque de área variable .	12
Figura 8. Diagrama en bloques - Modelo matemático de un tanque de área constante	13
Figura 9. Divisor de flujo.....	13
Figura 10. Planta de Tanques Multivariable diseñada	16
Figura 11. Tablero de Control	17
Figura 12. Tanques de almacenamiento	22
Figura 13. Motobombas	22
Figura 14. Sensores transmisores de nivel ECHO POD y U-GAGE	22
Figura 15. Sensores de flujo METALEX 525 +GF SIGNET y series SFI-800 W.E. Anderson.....	23
Figura 16. Transmisor de flujo +GF SIGNET 8550-1	24
Figura 17. Electroválvulas EBCHQ	24

Figura 18. Válvulas manuales de bola ITALY y KEYSER	25
Figura 19. Variadores de Velocidad PowerFlex	25
Figura 20. Tarjeta DAQ National Instruments	27
Figura 21. Relevos electromecánicos y de estado solido.....	28
Figura 22. BREAKER AC	28
Figura 23. Luces piloto del tablero de control.....	29
Figura 24. Fuente de 24V DC	29
Figura 25. Diagrama de flujo de la planta.....	33
Figura 26. Diagrama P&ID	34
Figura 27. Grafica relación entre divisor de flujo y flujo de entrada.....	38
Figura 28. Curva de comportamiento Tanque 1	39
Figura 29. Curva de comportamiento Tanque 2.....	40
Figura 30. Curva de comportamiento Tanque 3.....	40
Figura 31. Curva de comportamiento Tanque 4.....	41
Figura 32. Curva de comportamiento real Tanque 1	42
Figura 33. Curva de comportamiento real Tanque 2.....	42
Figura 34. Curva de comportamiento real Tanque 3.....	43
Figura 35. Curva de comportamiento real Tanque 4.....	443
Figura 36. Prueba 1 – dinámica de comportamiento tanque 1	44
Figura 37. Prueba 1 – dinámica de comportamiento tanque 2.....	44
Figura 38. Prueba 1 – dinámica de comportamiento tanque 3.....	44
Figura 39. Prueba 1 – dinámica de comportamiento tanque 4.....	45

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros de configuración de los variadores de velocidad	26
Tabla 2. Parámetros de los tanques.....	36

1 INTRODUCCION

En los últimos años se ha podido observar que el avance tecnológico ha ido evolucionado rápidamente dando más opciones al hombre de comodidad, confianza y eficiencia. Este avance no solamente ha sido vivido en la cotidianidad si no que se ha podido observar a nivel industrial, donde las anteriores tecnologías han pasado a un segundo plano y las nuevas tendencias de comunicación, control y monitoreo han mejorado la calidad de procesos realizados y la vida de los trabajadores ayudándoles a hacer un trabajo cada vez más efectivo.

Es por esto, que la educación en las ingenierías ha ido cambiando buscando ofrecer a los nuevos profesionales conocimiento enfocado a estas nuevas tecnologías. Sin embargo, esto se ha podido ver más en un conocimiento teórico que en el práctico.

La educación en ingeniería está asociada a dos niveles de conocimiento: el teórico y el práctico. Mientras que el conocimiento teórico puede ser fácilmente transferido a los estudiantes en las clases presenciales, muchos de los problemas propuestos en ellas, en ciertas ocasiones únicamente se llegan a comprender tras horas de experimentación en el laboratorio [1].

El Programa de Ingeniería en Automática Industrial de la Universidad del Cauca, se ha preocupado por llevar a cabo diferentes trabajos en el Laboratorio de Control de Procesos con el propósito de mejorar el proceso educativo en los estudiantes buscando una mayor interactividad durante el aprendizaje y poniendo en práctica los conocimientos adquiridos. Estos trabajos han estado enfocados tanto al manejo de instrumentos como a la simulación y construcción de sistemas.

La importancia de que el laboratorio tenga a disposición de los estudiantes un conjunto de plantas es fundamental para consolidar la teoría brindada en las materias de la carrera. Actualmente, se puede observar en el laboratorio de Procesos que las prácticas de laboratorio se han enfocado al control y monitoreo de sistemas con una entrada y una salida (SISO) que han brindado un gran conocimiento en este tipo de sistemas. Sin embargo, todos los procesos a nivel industrial no son sistemas SISO sino

que muchos casos son de dos o más variables que se utilizan para realizar control y monitoreo ya sea en líneas de producción, en procesos independientes (por ejemplo, preparación de alguna pre mezcla para luego pasar a un proceso de producción general), en tanques de preparación y almacenamiento, entre otros. La literatura permitió identificar que el desarrollo de sistemas multivariables para la formación de ingenieros han sido enfocados a sistemas de tanques y es a partir de esta identificación que nace el deseo de poder contar en el Laboratorio de Control de Procesos con una planta de tanques que permitiera trabajar con sistemas de este tipo y poder ofrecer a los estudiantes del programa de Ingeniería en Automática Industrial o de cualquier otra ingeniería (caso especial al programa de Ingeniería Física con el que se trabajo en conjunto para lograr el desarrollo del proyecto), ampliar su conocimiento práctico en diseño y monitoreo de sistemas multivariables.

A nivel mundial y a nivel de Colombia, se han realizado trabajos con tanques como los mencionados a continuación: **LABORATORIO REMOTO PARA EL PROCESO DE LOS CUATRO TANQUES Y SU APLICACIÓN EN DOCENCIA DE CONTROL MULTIVARIABLE [2]**, **THE QUADRUPLE-TANK PROCESS: A MULTIVARIABLE LABORATORY PROCESS WITH AN ADJUSTABLE ZERO [3]**, **A QUADRUPLE TANK PROCESS CONTROL EXPERIMENT [4]**, **EXPERIENCIA DE TRABAJO EN EQUIPO: DISEÑO DE UNA PLANTA DE TANQUES ACOPLADOS [5]**, que fueron el punto de partida del diseño propio de la Planta de Tanques Multivariable para el Laboratorio de Control de Procesos.

Esta monografía expone la planta de tanques multivariable implementada, que a diferencia de las plantas de tanques mencionadas, cuentan con tuberías alternas para generar disturbios a la dinámica de llenado de los tanques y con dos tanques de área variable donde se implemento la instrumentación con la que se cuenta para el proyecto. Este diseño físico parte del modelado del esquema básico de la planta, seguido de una descripción de cada uno de los instrumentos y equipos con los que cuenta la planta. Para la implementación de la planta se hizo un diseño previo utilizando Solid Edge (herramienta CAD) que permitió ver a escala y en 3D la planta de tanques. Finalmente se exponen los resultados obtenidos en cuando al comportamiento del sistema comparado con el modelo obtenido de la planta y verificar el diseño planteado.

2 MODELADO DEL ESQUEMA BASICO DE LA PLANTA

El objetivo de este primer capítulo es modelar el esquema básico de la planta de tanques multivariable, el cual consta del modelo matemático de un tanque de área constante, del modelo de un tanque de área variable y por último, el modelo del sistema completo. Adicional se crea un diagrama de bloques para obtener el modelo simulado del esquema básico de la planta utilizado para las pruebas comportamiento en simulación y finalmente exponer las especificaciones bajo las cuales se realizó el diseño físico de la planta.

2.1 DESCRIPCION Y FUNCIONAMIENTO DEL ESQUEMA BASICO DE LA PLANTA

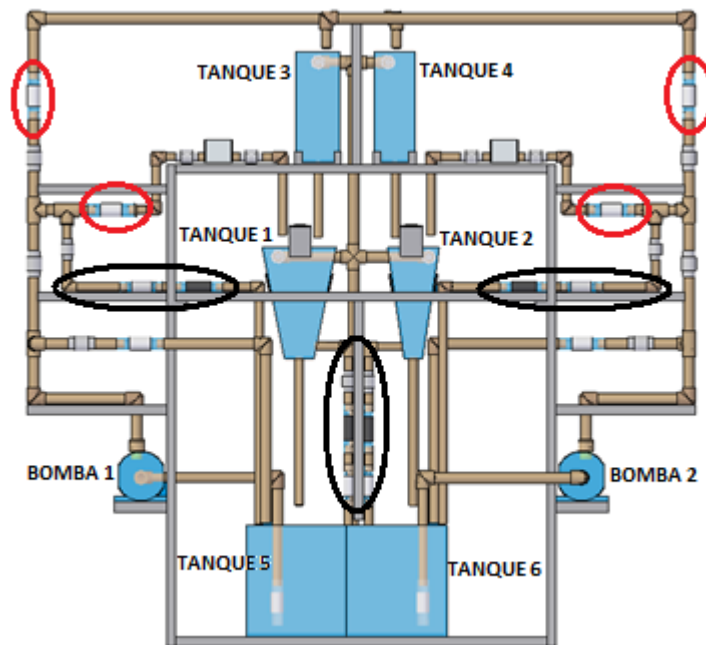


Figura 1. Esquema básico de la planta de tanques multivariable

La planta que se diseñó cuenta con 6 tanques de almacenamiento y dos motobombas (Figura 1). Estas motobombas impulsan agua desde los tanques 5 y 6 (tanques pulmón) hacia los cuatro tanques ubicados en los 2 niveles superiores; la motobomba 1 alimenta los tanques 1 y 4 y la motobomba 2 los tanques 2 y 3. Los tanques 3 y 4 son tanques de área constante y los tanques 1 y 2 son de área variable.

Dependiendo de la apertura de las válvulas manuales ubicadas en las tuberías de entrada de los tanques 1, 2, 3 y 4 (resaltadas por óvalos rojos en la Figura 1) y el flujo entregado por las motobombas al sistema, el flujo de entrada a cada tanque cambiará y como consecuencia, los niveles alcanzados por el agua serán diferentes.

El diseño físico de la planta permite que el flujo este circulando constantemente por el circuito hidráulico, ya que el agua que entra a los tanques 1, 2, 3 y 4 retorna a los tanques pulmón por medio de agujeros de desagüe que tiene cada tanque. Los tanques 3 y 4 se vacían en los tanques 1 y 2 y estos a su vez se vacían en los tanques pulmón.

Cabe aclarar que los equipos e instrumentos obtenidos para el desarrollo de este proyecto solo alcanzaban para instrumentar dos de los cuatro tanques con los que cuenta planta. Como fue mencionado en la introducción de esta documentación, existen diferentes proyectos realizados con cuatro tanques cuyo control era realizado en los tanques intermedios (para este caso, tanques 1 y 2). Basados en este argumento, se decidió mantener esta tendencia y hacer control sobre los mismos tanques.

El flujo que entra y sale de los tanques 1 y 2 puede ser modificado por tuberías adicionales a las tuberías que alimentan los tanques y por otras tuberías de desagüe (resaltadas por óvalos negros en la Figura 1) para generar cambios en la dinámica del sistema. La cantidad del flujo derivado por estas tuberías es controlada por la apertura de válvulas ubicadas en dichas tuberías.

2.2 MODELO MATEMATICO DE LA PLANTA

MODELO MATEMÁTICO DE UN TANQUE DE AREA CONSTANTE

Como se pudo observar en la descripción del esquema básico de la planta, los tanques 3 y 4 son tanques de área constante. A continuación se muestra el desarrollo para obtener el modelo matemático para estos tanques:

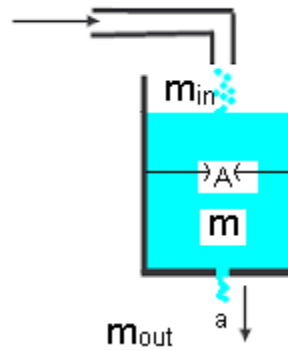


Figura 2. Tanque de área constante

Planteando el balance de masa en el tanque de la Figura 2 se obtiene:

$$\frac{dm}{dt} = m_{in} - m_{out} \quad (1)$$

m Masa de agua en el tanque

m_{in} Masa de agua que está entrando al tanque por unidad de tiempo

m_{out} Masa de agua que sale del tanque por un orificio por unidad de tiempo

En general se cumple:

$$m = \rho V \quad (2)$$

$$V = Ah \quad (3)$$

V Volumen del agua

A Área del tanque

h Altura del agua en el tanque

Y como la densidad del agua en el proceso es constante la ecuación 3 queda:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Los cambios en la masa solo dependerán de la variación del volumen. El volumen es igual al área interna del tanque por altura del agua (tanques de área constante), donde lo único que cambiará será la altura. La expresión 4 se modifica de la siguiente manera:

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

Por otra parte se deriva la expresión de la masa de agua que sale del tanque. Conociendo que caudal es:

$$Q = av \quad (6)$$

Q Caudal
 a Área del orificio de desagüe
 v Velocidad del agua en la sección del orificio

Y que la velocidad está definida por la siguiente expresión (Teorema de Torricelli [6]):

$$v = \sqrt{2gh} \quad (7)$$

Entonces:

$$Q = a\sqrt{2gh} \quad (8)$$

$$m_{out} = \rho Q \quad (9)$$

Reemplazando el valor de la masa de agua de salida y de la masa de agua en el tanque se obtiene:

$$\rho A \frac{dh}{dt} = \rho Q_{in} - \rho a \sqrt{2gh} \quad (10)$$

Como el líquido es agua entonces todas las densidades son las mismas y se pueden cancelar. Organizando la ecuación:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in}}{A} - \frac{a}{A} \sqrt{2gh} \quad (11)$$

Sin embargo, en esta ecuación no se han considerado las pérdidas por fricción, tensión superficial y viscosidad del líquido que pueden hacer que la velocidad del agua en el desagüe sea diferente a la velocidad teórica. Por ese motivo, se agrega el término C_v a la ecuación 11:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in}}{A} - \frac{a}{A} C_v \sqrt{2gh} \quad (12)$$

C_v Coeficiente de velocidad

El coeficiente de velocidad es la relación entre la velocidad media real en la sección recta de la corriente (chorro) y la velocidad media ideal que se tendría sin rozamiento.

MODELO MATEMATICO DE UN TANQUE DE ÁREA VARIABLE

En la descripción del esquema básico de la planta se menciona que los tanques 1 y 2 son tanques de área variable. El tanque de área variable que se muestran en la Figura 3 es un tanque cuya área es un cuadrado proporcional a su altura. Se selecciono el área de estos tanques como cuadrada por facilidad en su fabricación.

El modelo de este tanque se diferencia del modelo del tanque de área constante en que su área en cierto punto dependerá de la altura.

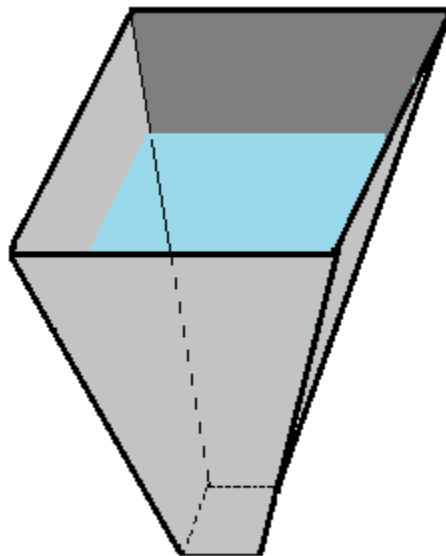


Figura 3. Tanque de área variable

A continuación se halla la relación entre altura y área:

$$y(x) = mx + b$$

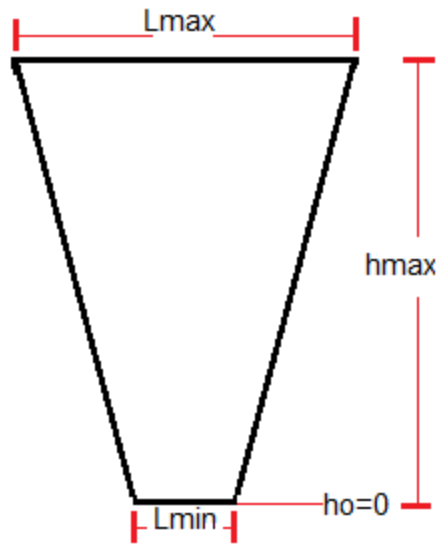


Figura 4. Vista frontal del tanque de área variable

$$L(h) = mh + b$$

$L(h)$ Función de la variación de un lado con respecto a la altura

Cuando $h=0$ entonces $b=Lmin$

El valor de la pendiente:

$$m = \frac{Lmax - Lmin}{hmax - h0} \quad (13)$$

El área de un cuadro

$$A = L^2 \quad (14)$$

$$A = (mh + Lmin)^2 \quad (15)$$

Reemplazando la ecuación 15 en la ecuación 12, se obtiene la ecuación de la altura para el tanque de área variable:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in}}{(mh + Lmin)^2} - \frac{a}{(mh + Lmin)^2} C_v \sqrt{2gh} \quad (16)$$

MODELO MATEMATICO DE LOS CUATRO TANQUES

A partir de los modelos matemáticos obtenidos para los tanques de área constante y de área variable en esta sección, a continuación se presenta el modelo matemático de la planta (tanques 1, 2, 3 y 4 de la Figura 1). Este modelo representa la relación que hay entre el flujo de entrada y la altura alcanzada por el agua en los cuatro tanques en el tiempo.

Tener presente que para los tanques 1 y 2 el área es:

$$A_1 = (m_1 h_1 + L_1 \text{min})^2 \quad (17)$$

$$A_2 = (m_2 h_2 + L_2 \text{min})^2 \quad (18)$$

Tanques inferiores: tanques de área variable

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{F_1}{A_1} - C v_1 \frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + C v_3 \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} \quad (19)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{F_2}{A_2} - C v_2 \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + C v_4 \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} \quad (20)$$

Tanques superiores: tanques de área constante

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{F_3}{A_3} - C v_3 \frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} \quad (21)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = \frac{F_4}{A_4} - C v_4 \frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} \quad (22)$$

- A_i Área de la sección de los 4 tanques en cm.
- a_i Área del orificio de desagüe de los 4 tanques en cm².
- g Gravedad en cm²/s.
- F_i Flujo que entra al tanque i cm³/s.

El modelo de la planta también cuenta con las siguientes ecuaciones que representan el flujo de entrada a cada tanque proveniente de las motobombas. Estas ecuaciones se modelan a partir de la división física de las tuberías de entrada a los tanques (Te) y la apertura de válvulas manuales ubicadas en las mismas tuberías referenciadas con círculos rojos en la Figura 1:

$$F_1 = \gamma_1 k F_{m1} \quad (23)$$

$$F_2 = \gamma_2 k F_{m2} \quad (24)$$

$$F_3 = (1 - \gamma_2) k F_{m2} \quad (25)$$

$$F_4 = (1 - \gamma_1) k F_{m1} \quad (26)$$

k Constante de conversión de L/min en cm^3/s .

γ_i Coeficiente divisor de flujo: representa el porcentaje o fracción de apertura de las válvulas manuales hacia los tanques 1 y 2.

F_{mi} Flujo que proviene de la bomba en L/min.

- Coeficiente divisor de flujo: Representa la parte del proceso en donde el agua suministrada por las bombas se deriva para los tanques 1 y 4 o 2 y 3. El valor de este factor se encuentra entre uno y cero, donde 1 indica que toda el agua es dirigida al tanque uno o dos y 0 que el flujo es dirigido a los tanques cuatro o tres.
- $(1 - \gamma)$: porcentaje o fracción de apertura de las válvulas hacia los tanques 3 y 4. Por ejemplo para el tanque cuatro, es la cantidad de agua proveniente de la motobomba uno que no alimento al tanque uno (efecto de la división de las dos tuberías).
- La constante de conversión k es una constante utilizada para manejar el flujo cm^3/s .

2.3 MODELO DE SIMULACIÓN DE LA PLANTA

Por ser el sistema multivariable y contener elementos no lineales (tanques de área variable), se emplea una herramienta computacional para la obtención de las soluciones de las ecuaciones diferenciales del modelo matemático, tener un acercamiento al comportamiento de la planta, y tras múltiples simulaciones escoger los valores más adecuados de los parámetros del modelo según los requerimientos.

Los parámetros de diseño de la planta son escritos en Matlab y enviados a Simulink para la simulación. Estos parámetros son los siguientes: áreas de la sección de los tanques, áreas de los orificios de desagüe, gravedad y constante de conversión.

Después, se creó un diagrama de bloques general que muestra el comportamiento de las alturas de los cuatro tanques a partir de la abertura de las válvulas y el flujo proveniente de las bombas (Figura 5).

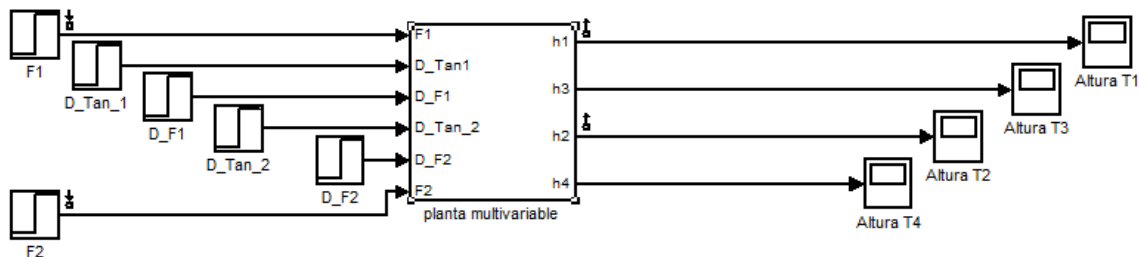


Figura 5. Diagrama de bloques – Planta multivariable

El bloque de planta multivariable de la Figura 5, es un contenedor en el que se encuentra el modelo de la planta en diagrama de bloques Figura 6. En este modelo se puede observar la distribución de flujo de entrada a los cuatro tanques, donde el flujo impulsado por la motobomba 1 se distribuye a través de un divisor de flujo hacia los tanques 1 y 4 y el flujo impulsado por la motobomba 2 se distribuye a los tanques 2 y 3. El flujo total de entrada a los tanques 1 y 2 es equivalente al flujo que fue dividido provenientes de las motobombas más el flujo de desagüe de los tanques 3 y 4.

Planta de Tanques Multivariable

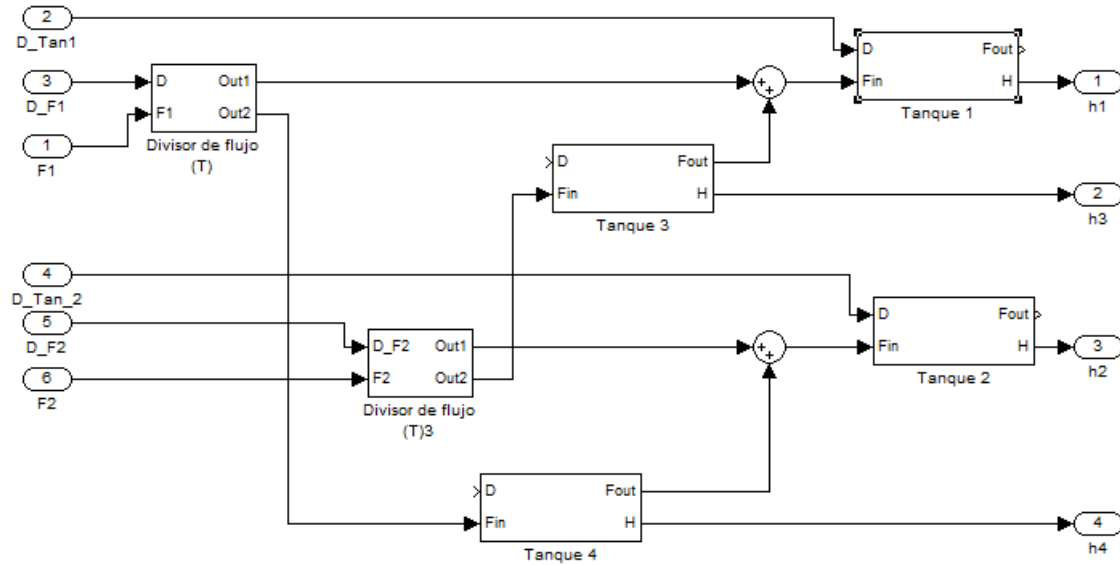


Figura 6. Diagrama de bloques – Modelo de la planta

La planta cuenta con dos tanques de area constante (tanques 3 y 4) y dos de area variable (tanques 1 y 2) representados por bloques (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). La Figura 7 y la Figura 8, muestran los modelos matematicos de los tanques obtenidos en el capítulo 2.2 MODELO MATEMATICO DE LA PLANTA

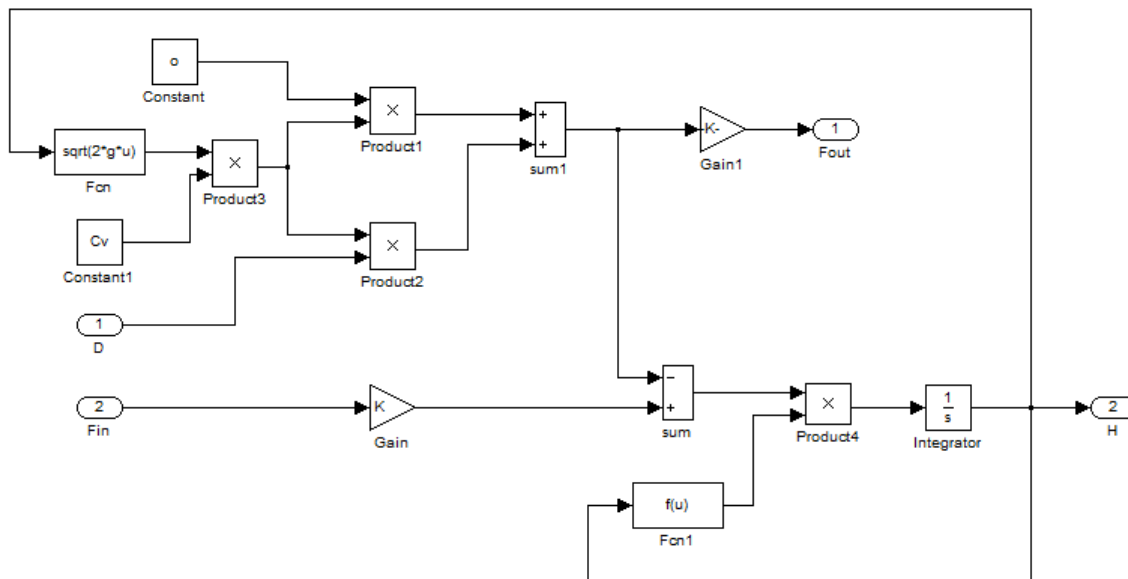


Figura 7. Diagrama de bloques – Modelo matemático de un tanque de área variable

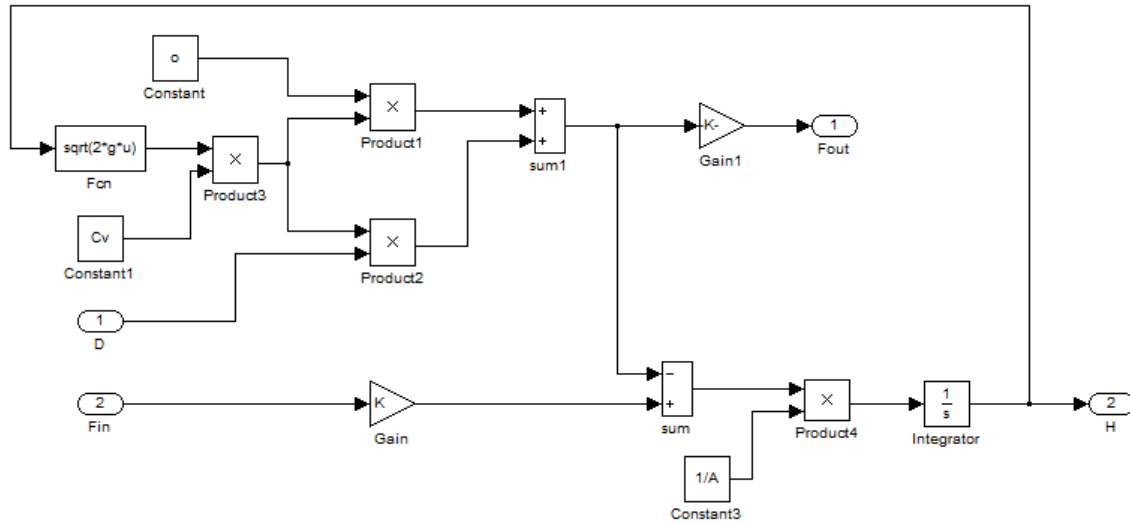


Figura 8. Diagrama en bloques - Modelo matemático de un tanque de área constante

Finalmente, se observa en la Figura 6 que la planta tanques multivariable cuenta con dos divisores de flujo, representados físicamente con una Te y dos válvulas manuales, para controlar la cantidad de flujo de entrada a cada par de tanques (1-3 y 2-4). Las válvulas serán configuradas de forma experimental con el fin de encontrar el valor del coeficiente γ_i (o fracción de apertura de las válvulas manuales hacia los tanques 1 y 2) y que el modelo matemático se asemeje al comportamiento de la planta real. La Figura 9 muestra el diagrama de bloques el divisor de flujo implementado:

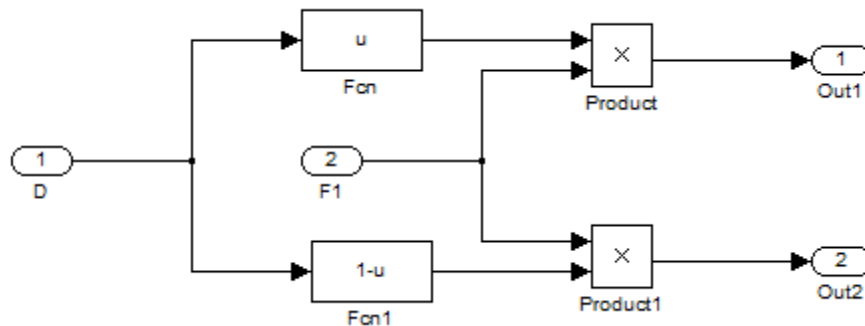


Figura 9. Divisor de flujo

En el capítulo 3 se muestran las graficas de simulación obtenidas para el modelo matemático de la planta.

2.4 ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA

Para el diseño físico de la planta que será mostrado en el siguiente capítulo, fue necesario definir las especificaciones bajo las cuales iba a trabajar la planta. A continuación se mencionan estas especificaciones y al final se indicaran los valores seleccionados para el diseño:

Tras experiencias de trabajo en el Laboratorio de Control de Procesos del Programa de Ingeniería en Automática Industrial, se pudo observar que las respuestas de algunas plantas eran demasiado lentas. Por ejemplo, la Planta de Nivel tiene aproximadamente una respuesta de 9 minutos para llegar al valor final. Es por esto se definió un tiempo de establecimiento pequeño con el fin de obtener una respuesta rápida de la planta de tanques multivariable ante cualquier cambio en el flujo de entrada o salida de los tanques o ante cualquier cambio en el nivel del agua. El valor seleccionado para este tiempo fue de cuatro minutos.

Buscando obtener diferentes dinámicas de llenado para cada tanque de la planta, se establecieron diferentes constantes de tiempo que estuvieran dentro del rango establecido para el tiempo de establecimiento de la planta. Como fue expuesto en la descripción del esquema básico de la planta, en la planta se tiene la posibilidad de generar cambios en la dinámica por las tuberías alternas con las que cuenta, es por ello que a dichas tuberías se le adicionaron electroválvulas para controlar la cantidad de flujo de entrada a los tanques 1 y 2 de la planta (Figura 1).

De acuerdo al diseño deseado de la planta y teniendo en cuenta el tamaño del área de trabajo disponible en el Laboratorio de Control de Procesos, se planteo que la altura máxima de la planta (Figura 1) ha diseñar no superara los 2 metros para evitar sobredimensionarla. Basado en esta altura máxima, se definió la altura de iban a tener los seis tanques de la planta. La altura propuesta para los tanques 1, 2, 3 y 4 es de 30 cm y 45 cm para los tanques 5 y 6.

Actualmente las plantas del Laboratorio de Procesos ofrecen a los estudiantes diferentes escenarios de automatización (PC, PLC, Stand Alone). Es por esto que para dar más posibilidades a los usuarios (estudiantes, profesores, laboratoristas, etc.) que vayan a trabajar con la planta, se planteo utilizar dos escenarios de control: basado en PC y basado en PLC. El diseño final de la planta cuenta con un selector que permite trabajar con cualquiera de estos dos escenarios.

3 DISEÑO FÍSICO DE LA PLANTA

Con el modelado del esquema básico de la planta realizado, el siguiente paso es hacer el diseño físico de la planta a partir de las especificaciones definidas en el primer capítulo. Es por esto que el objetivo de este capítulo será el dar una descripción general de la planta, una descripción de cada uno de los equipos e instrumentos seleccionados a partir de las especificaciones de funcionamiento y mostrar la documentación utilizada para etiquetar la planta. Para la implementación final de la planta, se utilizó el software de Solid Edge (herramienta CAD) para hacer el diseño en 3D de la planta a escala y poder definir las longitudes y tamaños de las tuberías y la estructura de metal que soportará los tanques y la instrumentación. El **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las figuras diseñadas en este software.

3.1 DESCRIPCION DE LA PLANTA

La planta diseñada cuenta con instrumentos ubicados en dos áreas: campo y tablero de control. Los instrumentos de campo son los mismos que se mencionaron en la descripción del esquema básico de la planta; se cuenta con 6 tanques de almacenamiento y dos motobombas. Estas motobombas impulsan agua desde los tanques 5 y 6 (tanques pulmón) hacia los cuatro tanques ubicados en los 2 niveles superiores; la succión de las motobombas tiene tubería de 1 pulgada. La motobomba 1 alimenta los tanques 1 y 4 y la motobomba 2 los tanques 2 y 3 a través de tuberías PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Los tanques 3 y 4 son tanques de área constante y los tanques 1 y 2 son de área variable. Las tuberías que alimentan los tanques 1, 2, 3 y 4 cuentan con válvulas manuales utilizadas para controlar la cantidad de agua que va ir dirigida a cada tanque (Figura 10).



Figura 10. Planta de Tanques Multivariable diseñada

El diseño físico de la planta permite que el flujo este circulando constantemente por el circuito hidráulico, ya que el agua que entra a los tanques 1, 2, 3 y 4 retorna a los tanques pulmón por medio de tuberías de desagüe que tiene cada tanque. Los tanques 3 y 4 se vacían en los tanques 1 y 2 y estos a su vez se vacían en los tanques pulmón.

Las tuberías que alimentan los tanques 1 y 2 cuentan tuberías alternas que permiten derivar parte del caudal de entrada a los tanques con el fin de generar cambios en la dinámica de la planta. Estas tuberías cuentan con una válvula manual y una electroválvula para controlar la cantidad de agua derivada. Igualmente los tanques 1 y 2 cuentan con tuberías de desagüe con una válvula manual y una electroválvula con el mismo objetivo de generar un disturbio al sistema.

Con el fin de medir constantemente el flujo de entrada y el nivel de los tanques 1 y 2 de la planta, se cuenta con cuatro sensores y transmisores. Los transmisores de nivel se encuentran ubicados sobre los tanques y los sensores de flujo fueron ubicados en las tuberías de alimentación de los tanques después de la ubicación de las tuberías alternas.

Los instrumentos de tablero de control son los encargados de activar las motobombas y electroválvulas y de recibir las señales enviadas por los sensores de caudal y de nivel (Figura 11).



Figura 11. Tablero de Control

Dependiendo del flujo entregado por las motobombas al sistema, el flujo que entra a cada tanque aumentará o disminuirá y como consecuencia, los niveles alcanzados por el agua serán diferentes. Esta cantidad de flujo es controlada por dos variadores de velocidad monofásicos PowerFlex 4M de Allen Bradley que requieren ser configurados de acuerdo a las características de las motobombas utilizadas en la planta. Estos variadores son los encargados de encender y/o apagar las motobombas a través de una señal de control.

La planta cuenta con 6 relevos electromecánicos que permiten activar las electroválvulas y las motobombas y condicionar el control de la planta, es decir, si va a ser manejado por PC o por un PLC.

Los equipos mencionados son los últimos instrumentos de activación, ya que las señales son enviadas desde una Tarjeta de Adquisición de Datos (Tarjeta PCI 6024-E de National Instruments) ubicada en el computador y comunicadas a través de una tarjeta CB 68-LP que sirve de interfaz entre la Tarjeta de Adquisición de Datos y los instrumentos. Las salidas de la tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) trabajan a 5 V y como las electroválvulas y las motobombas trabajan a 110 V, se implementaron relevos de estado sólido con el fin de convertir la señal entregada por la DAQ a 110V.

La alimentación para los sensores de nivel y flujo es entregada por una fuente de 24V DC (Allen Bradley) y la alimentación de 110V que permite encender toda la instrumentación es controlada por un BREAKER AC de 16A. Finalmente, el tablero de control cuenta 4 luces pilotos que serán las encargadas de indicar el estado "OK" o "falla" de los variadores.

3.2 DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DE LA PLANTA

DISEÑO DE LAS ÁREAS DE LOS TANQUES

El diseño de las áreas de los tanques es el primer diseño a considerar ya que a partir de sus especificaciones físicas (áreas y volumen), se pudieron establecer criterios de diseño para la selección la instrumentación de la planta.

La ecuación de la constante de tiempo τ será el punto de partida del diseño de los tanques 1, 2, 3 y 4 ya que permite identificar la relación que existe entre el área del tanque, el área de desagüe y el coeficiente de velocidad. La constante τ es el tiempo que tarda el nivel del agua en los tanques en alcanzar el 63,5% de su altura y el tiempo de establecimiento será de 5 veces τ . Teniendo en cuenta este concepto, el valor de τ tiene que ser seleccionado de tal manera que el tiempo de establecimiento no supere los 3 minutos establecidos como especificación de funcionamiento.

Todos estos criterios fueron utilizados para encontrar los valores de las áreas de los tanques y obtener su diseño.

La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$\tau = \sqrt{\frac{2h_0}{g} \frac{A}{aC_v}} \quad (27)$$

τ Constante de tiempo

h_0 Altura de operación

g Gravedad

C_v Coeficiente de velocidad

A Área del tanque

a Área de desagüe

El procedimiento para obtener esta ecuación, es explicado en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Con el fin de obtener la máxima relación entre las áreas para que el tiempo de establecimiento no supere los 4 minutos, se definen las siguientes condiciones:

- a. La altura de operación no debe sobrepasar la altura máxima de 30 cm que es la altura de los cuatro tanques definida en las especificaciones de la planta.
- b. El Valor de la constante τ debe ser seleccionado para que el tiempo de establecimiento no supere los cuatro minutos, valor establecido dentro de los *criterios de selección de los instrumentos de la planta*.

Los valores seleccionados son los siguientes:

$$\begin{aligned}h_0 &= 25 \text{ cm;} \\g &= 980 \text{ cm/s}^2 \\Cv &= 0.83 \\ \tau &= 36s\end{aligned}$$

Y remplazándolos en la ecuación de la constante de tiempo τ se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{A}{a} \leq 176,38 \quad (28)$$

Esta es la relación que permitió definir las áreas de los tanques y las áreas de los desagües. En el caso de los tanques 1 y 2 (tanques de área variable) su diseño partió de un tanque de área constante para cumplir con la relación de áreas. Luego con el fin de obtener un área variable y que se notara la variación, se redujo el lado inferior del tanque para que fuera mínimo dos veces más pequeño que el lado de su parte superior.

El diseño de los tanques pulmón 5 y 6 (Figura 10) parte de la cantidad de agua que pueden almacenar los tanques 1, 2, 3 y 4. Al sumar estas cantidades de agua, se define el volumen total con que se llenaran los tanques. Teniendo claro este valor y que la altura de estos tanques debe ser de 35 cm (ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA), el tamaño de los tanques pulmón fue escogido para almacenar el volumen total de llenado más el agua que pueda quedar en las tuberías cuando finalice la actividad de las motobombas. Valor seleccionado: dos veces el volumen total de llenado.

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE LA PLANTA

Una vez definido el diseño de las áreas de los tanques y considerando las especificaciones de la planta (ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA) se muestran a continuación los criterios utilizados para seleccionar la instrumentación de la planta:

1. El tiempo de establecimiento tiene que ser minutos (5 veces T_{ao}).
2. El nivel del agua en los tanques 1, 2, 3 y 4 no debe ser mayor a la altura máxima de los tanques: 30 cm.
3. El caudal máximo que puede llegar a un tanque es de 30 litros/min. Este valor fue seleccionado a partir de la simulación del modelo matemático de la planta (capítulo 3).
4. Una vez definidas las motobombas, los variadores tienen que ser seleccionados de acuerdo a las especificaciones del fabricante de las bombas.
5. Como la alimentación eléctrica con la que cuenta el Laboratorio de Control de Procesos es de 110V, los instrumentos deben ser seleccionados para trabajar bajo esta condición.
6. El lado inferior de cada tanque de área variable debe ser mínimo dos veces más pequeño que el área de lado superior del tanque. El lado inferior del tanque debe ser mayor que el diámetro del desagüe.

3.3 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS INSTRUMENTOS LA PLANTA

3.3.1. INSTRUMENTOS DE CAMPO

TANQUES DE ALMACENAMIENTO

La planta cuenta con 6 tanques de almacenamiento, 4 de ellos ubicados en dos niveles (dos de área variable y dos de área constante). La forma en que fueron diseñados estos tanques parte de la relación de áreas definida en el diseño de la instrumentación de la planta.

1. Tanque 1: lado inferior: 8 cm, lado superior: 20 cm, área de desagüe de 2,8502 cm^2
2. Tanque 2: lado inferior: 5 cm, lado superior: 14 cm, área de desagüe de 2,8502 cm^2
3. Tanque 3: área del tanque: 200 cm^2 , área de desagüe: 1,3179 cm^2
4. Tanque 4: área del tanque: 300 cm^2 , área de desagüe: 1,5890 cm^2

Estos valores son obtenidos en la simulación del modelo matemático y es expuesto en el capítulo 3.

Los tanques restantes, son tanques pulmón con la capacidad de almacenar el doble del volumen total de llenado (DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DE LA PLANTA).

La Figura 13, muestra los 6 tanques ubicados en su estructura final.

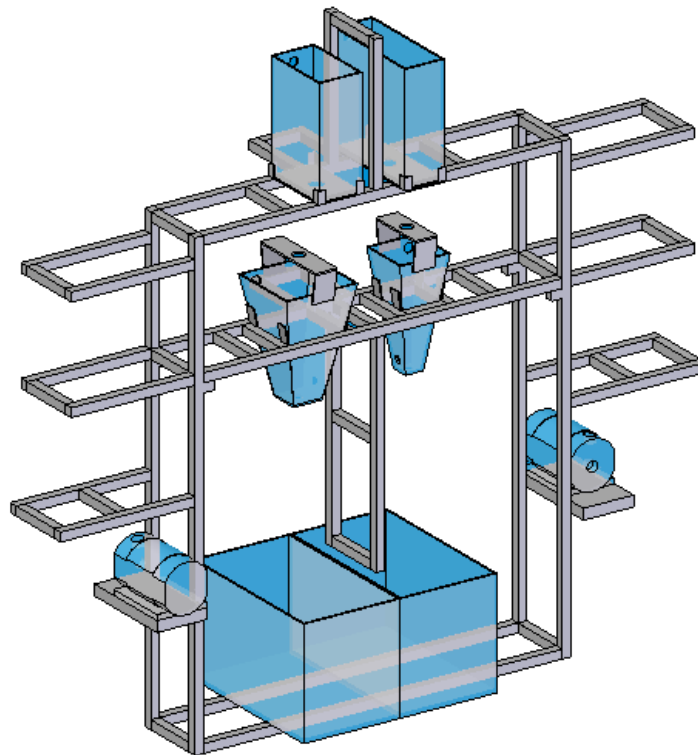


Figura 12. Tanques de almacenamiento

MOTOBOMBAS

De acuerdo al diseño físico de la planta, para llenar los tanques y obtener diferentes alturas y tiempo de establecimiento, se definió un caudal de 30 litros/min según los criterios de selección de los instrumentos de la planta. Las motobombas deben trabajar a 110V y tener una columna de elevación mínima de 2 metros (2.4 ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA).

La Figura 13 muestra las bombas seleccionadas según los criterios mencionados en conjunto con sus especificaciones.



ESPECIFICACIONES

Voltaje 115 - 127V
Corriente 3,5 A
Caudal máx. 36 l/m
Frecuencia 60 HZ
H. máx. 40m
Potencia ½ HP

Figura 13. Motobombas

SENSORES TRANSMISORES DE NIVEL

Con el fin de monitorear el comportamiento del nivel de agua en los tanques 1 y 2 y teniendo en cuenta que la altura máxima de llenado no debe pasar los 30 cm, se seleccionaron dos sensores de nivel que pudieran transmitir una señal de 4 a 20 mA proporcional a la altura medida.

La Figura 14, muestra Los sensores utilizados en la planta y sus especificaciones.



Rango máx. 1,25 m
Voltaje 24V DC
Señal de Salida 4-20 mA
Temp. -20°C-60°C



Rango 150mm-1m
Voltaje 12-24V DC
Señal de Salida 4-20 mA
Temp. -20°C-70°C

Figura 14. Sensores transmisores de nivel ECHO POD y U-GAGE

El sensor de nivel ECHO POD requiere ser configurado a través de software del fabricante (Web Cal) para poder enviar una señal de acuerdo a la altura del agua en el tanque. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la pantalla

principal del software *Web Cal* donde es

configurado el transmisor. La forma de configuración es expuesta en el manual de usuario del fabricante [7]. Para el caso del sensor U-GAGE, la configuración es realizada en la interfaz física que tiene; el manual de usuario [8] expone la forma de configuración.

SENSORES DE FLUJO

Las tuberías de entrada a los tanques inferiores cuentan con dos sensores de caudal, que a través de pulsos y corriente, envían una señal dependiendo de la cantidad de flujo que pase por ellos permitiendo monitorear constantemente este valor.

Según los criterios de selección de la instrumentación de la planta, el caudal máximo que puede entrar a un tanque es de 30 litros/min. Partiendo de este criterio, los sensores de flujo seleccionados debían tener como mínimo un rango de 0 a 30 litros/min para hacer la lectura de flujo correspondiente.

La Figura 15, muestra los sensores seleccionados con sus especificaciones.



Figura 15. Sensores de flujo METALEX 525 +GF SIGNET y series SFI-800 W.E. Anderson

TRANSMISOR DE FLUJO

Dependiendo de la cantidad de flujo medida por el sensor de flujo METALEX 525 +GF SIGNET, el transmisor de flujo +GF SIGNET 8550-1 envía una señal de 4 a 20 mA a la DAQ para indicar el valor medido de flujo que pasa por el sensor. La forma de cómo se

debe configurar este transmisor, se muestra en el manual de usuario del fabricante [9].

La Figura 16, muestra el transmisor +GF SIGNET 8550-1 utilizado para cumplir con objetivo de monitoreo.



Figura 16. Transmisor de flujo +GF SIGNET 8550-1

ELECTROVÁLVULAS

Con el fin de modificar la dinámica de la planta como fue expuesto en la descripción de la planta (3.1 DESCRIPCION DE LA PLANTA), fueron adaptadas a las tuberías de entrada y salida de los tanques inferiores, tuberías auxiliares con cuatro electroválvulas (Figura 17) que al ser activadas, generan cambios en el flujo de entrada y/o salida. Esta prueba fue realizada en simulación y es desarrollada físicamente para poder observar el comportamiento de la planta.



Figura 17. Electroválvulas EBCHQ

VÁLVULAS MANUALES

Al circuito hidráulico fueron adaptadas válvulas manuales de bola de $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ pulgada

Planta de Tanques Multivariable

marca ITALY y KEYSER con objeto de cumplir con las siguientes funciones:

- Controlar la cantidad de flujo que va a entrar a los cuatro tanques ubicados en los dos niveles.
- Controlar la cantidad de flujo que sale por las tuberías auxiliares por la activación de las electroválvulas.

La Figura 18 muestra las válvulas implementadas en la planta.

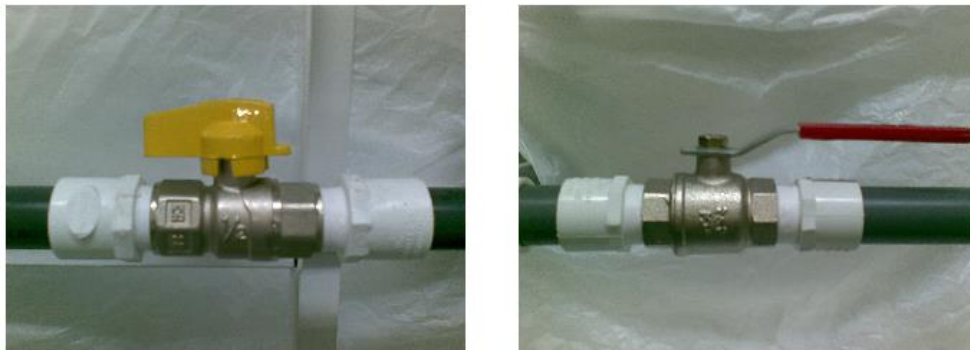


Figura 18. Válvulas manuales de bola ITALY y KEYSER

3.3.2. INSTRUMENTOS DEL TABLERO DE CONTROL

VARIADORES DE VELOCIDAD POWERFLEX 4M



Figura 19. Variadores de Velocidad PowerFlex

La planta cuenta con dos variadores de velocidad (Figura 19), que a partir de una orden

desde la interfaz hombre – máquina (HMI), controlar la velocidad de giro de las bombas y permitir aumentar o disminuir el flujo que entra al sistema. Su elección parte de las especificaciones de las motobombas utilizadas en la planta (ver Figura 14) y deben ser configurados bajo estas mismas especificaciones.

A continuación se muestra una tabla con los parámetros que requieren ser configurados para el caso de la planta multivariable que se diseñó. La forma de configuración es expuesta en el manual de usuario del fabricante [10]:

PARAMETRO	DESCRIPCION
P101	Volt placa Motor: voltaje nominal indicado en la placa del fabricante del motor
P102	Hz placa Motor: frecuencia nominal indicado en la placa del fabricante del motor
P103	Intens SC motor: máxima corriente permisible del motor
P104	Frecuencia Min: mínima frecuencia de salida del variador
P105	Frecuencia Max: máxima frecuencia de salida del variador
P106	Fuente arranque: esquema de control para poder en marcha el variador
P107	Modo de paro: modo de paro activo del variador
P108	Referencia Vel: fuente de referencia de velocidad para el motor
P109	Tiempo acel: tasa de aceleración para todos los aumentos de velocidad
P110	Tiempo decel: régimen de desaceleración para todas las reducciones de velocidad
P111	Ret SC Motor: Habilita/inhabilita la función de retención de sobrecarga del motor

Tabla 1. Parámetros de configuración de los variadores de velocidad

DAQ (TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS)

El control de encendido y apagado de los motores y las electroválvulas de la planta y el monitoreo de las diferentes variables medibles del sistema (sensores de flujo y de nivel) se hace a través de computador. Para ello, se utilizó una Tarjeta de Adquisición de Datos de National Instruments, la cual a través de una tarjeta CB 68-LP recibe y envía

señales de mando y monitoreo entre los instrumentos de campo y el tablero de control.

La Figura 20 muestra la Tarjeta de Adquisición de Datos (PCI 6024-E) con la que cuenta la planta.



Figura 20. Tarjeta DAQ National Instruments

RELEVOS ELETROMECÁNICOS Y DE ESTADO SÓLIDO

La planta cuenta con relevos electromecánicos y de estado sólido utilizados para activar las motobombas y las cuatro electroválvulas a partir de comandos enviados desde la Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

Los relevos de estado sólido convierten la señal de 5V entregados por la DAQ a 110V para polarizar las bobinas de los relevos electromecánicos. Con la polarización de las bobinas, los relevos electromecánicos hacen el contacto final para la activación de las electroválvulas y las motobombas.

La Figura 21 muestra los relevos electromecánicos y de estado sólido implementados en el tablero de control.

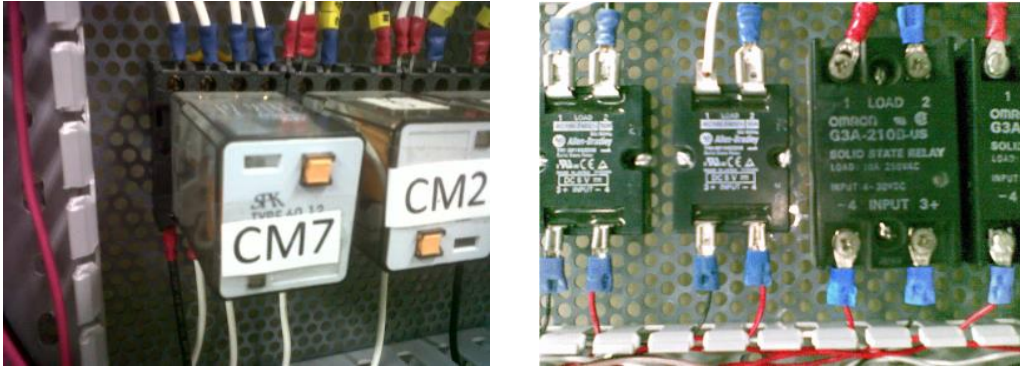


Figura 21. Relevos electromecánicos y de estado solido

BREAKER AC

La planta cuenta con un breaker AC de 16A (Figura 22) que permite alimentar el tablero de control y algunos instrumentos de campo (motobombas y electroválvulas) desde la alimentación eléctrica. El breaker protege los instrumentos de daños que puedan ser causados por sobrecarga o cortocircuito.



Figura 22. BREAKER AC

LLAVE SELECTORA

La activación y el monitoreo de los instrumentos de campo se hace a través de la Tarjeta de Adquisición de Datos. Sin embargo, el diseño de la planta permite que se puedan manejar dos escenarios de control: basado en PC y basado en PLC (2.4ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA). Es por esto, que la planta cuenta con una llave selectora que permitirá seleccionar cualquiera de los escenarios para monitorear y controlar los instrumentos de campo.

LUCES PILOTO

En el tablero de control fueron implementadas cuatro luces piloto para indicar el estado de los variadores de velocidad:

- Luz verde: estado de falla del variador
- Luz naranja: Estado OK del variador

Los bombillos H1 (luz naranja) y H2 (luz verde) son los indicadores de estado de un variador y los bombillos H3 (luz naranja) y H4 (luz verde) del segundo variador con el que cuenta la planta.



Figura 23. Luces piloto del tablero de control

FUENTE DE 24V

Esta fuente es utilizada para energizar los sensores de flujo y nivel y arrancar las motobombas a través de los variadores de velocidad.



Figura 24. Fuente de 24V DC

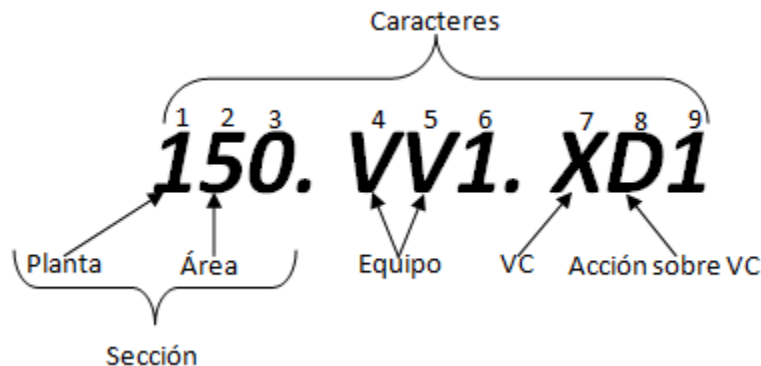
3.4 DOCUMENTACION

Con el diseño físico de la planta finalizado, el objetivo de esta sección es definir la documentación con la que se podrán identificar cada uno de los instrumentos del tablero de control y de campo. Para esta documentación se escogió el estándar de Siemens CEMAT.

A continuación se presenta la forma de cómo se hace la asignación de TAGs basado en este estándar y se da un ejemplo para uno de los instrumentos y señales con las que cuentan la planta. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentra toda la asignación generada y las tablas que reúnen toda la documentación:

Con el objeto de identificar los instrumentos, actuadores, equipos y señales que existen en la planta, se utiliza un código alfanumérico de 9 caracteres conocido como **TAG** que permite una mayor organización de la información.

La distribución de los 9 caracteres del **TAG** es como sigue:



Donde VC significa Variable Controlada (aquí el término controlada significa la variable, no necesariamente continua, sobre la cual se ejerce una acción (no necesariamente de control)) y los caracteres 3, 6 y 9 son consecutivos:

- El tercer carácter identifica la sección dentro del área.
- El carácter seis es un consecutivo para los equipos.
- El carácter nueve es un consecutivo de los caracteres siete y ocho.

1. Definición de la sección de trabajo:

Nombre de la planta (carácter 1): Laboratorio de control de procesos industriales.

Código: 1.

Nombre del área (carácter 2): Planta de Tanques Multivariable

Código: 7.

Como el área es muy pequeña no requiere ser subdividida en secciones por lo tanto el código asignado al carácter sección es 0.

Código Siemens CEMAT para los tres primeros caracteres: 170. Este código identifica la planta y el área de trabajo que será el mismo cuando se definan los TAGS de los instrumentos y las señales que hacen parte del área.

2. Los caracteres 4 y 5 corresponden a los instrumentos y equipos que hay en la planta. Normalmente deben utilizarse los dos caracteres para hacer referencia a ellos. Por ejemplo, las siguientes letras son utilizadas para identificar algunos de los instrumentos y equipos de la Planta de tanques Multivariable:

PI: Tubería

PP: Motobomba

VV: Electroválvula

WT: Tanque de Agua

3. El carácter 7 define la variable a controlar y se pueden emplear las siguientes letras para representarla (recomendadas según CEMAT):

E: Voltaje

I: Corriente

L: Nivel

M: Motor

P: Presión

Q: Cantidad, Flujo

S: Velocidad

T: Temperatura

“X”: Significa abierto, hacia delante, adentro, derecha, norte

“Y”: Significa cerrado, marcha atrás, afuera, izquierda, sur

4. El carácter 8 determina la acción que debe ser aplicada sobre la variable a controlar. CEMAT recomienda emplear como letras para representar acciones:

Planta de Tanques Multivariable

A: Alarma

D: I/O Discreta

O: General

S: Disparo o parada

T: Térmico (Sobre- carga)

“X”: Significa abierto, hacia delante, a la derecha

“Y”: Significa cerrado, hacia atrás, a la izquierda

Z: Señal análoga

El siguiente **ejemplo** ilustra la manera de utilizar los 9 caracteres del estándar CEMAT para conformar el TAG de un instrumento, equipo o señal.

Se necesita enviar una señal discreta desde la Tarjeta de Adquisición de Datos, de la planta de Tanques Multivariable, a la primera electroválvula ubicada en una de las tuberías alternas de la planta con el fin de restar caudal de entrada al tanque 1.

Se tiene que:

- Los tres primeros caracteres son 170, y para la Planta de Tanques Multivariable, siempre será así, pues se considero que solo contaba con una sección en el área.
- Los caracteres 4 y 5 que identifican al equipo (Electroválvula) con VV.
- Es la primera válvula, por lo que el carácter seis para este equipo es uno (1).
- Como el dispositivo para este caso debe ser abierto, se usa la letra X.
- La acción es una orden desde la DAQ, una salida discreta, por lo tanto el octavo carácter es una D.
- El carácter 9 es un consecutivo que para el ejemplo se toma como uno, si se necesitan controlar más señales discretas sobre el mismo equipo, estas se identificarán en el carácter nueve con consecutivos como dos, tres, cuatro.

El TAG completo de la señal es entonces: **170.VV1.XD1**

3.4.1. PLANO DE DIAGRAMA DE FLUJO Y ETIQUETADO

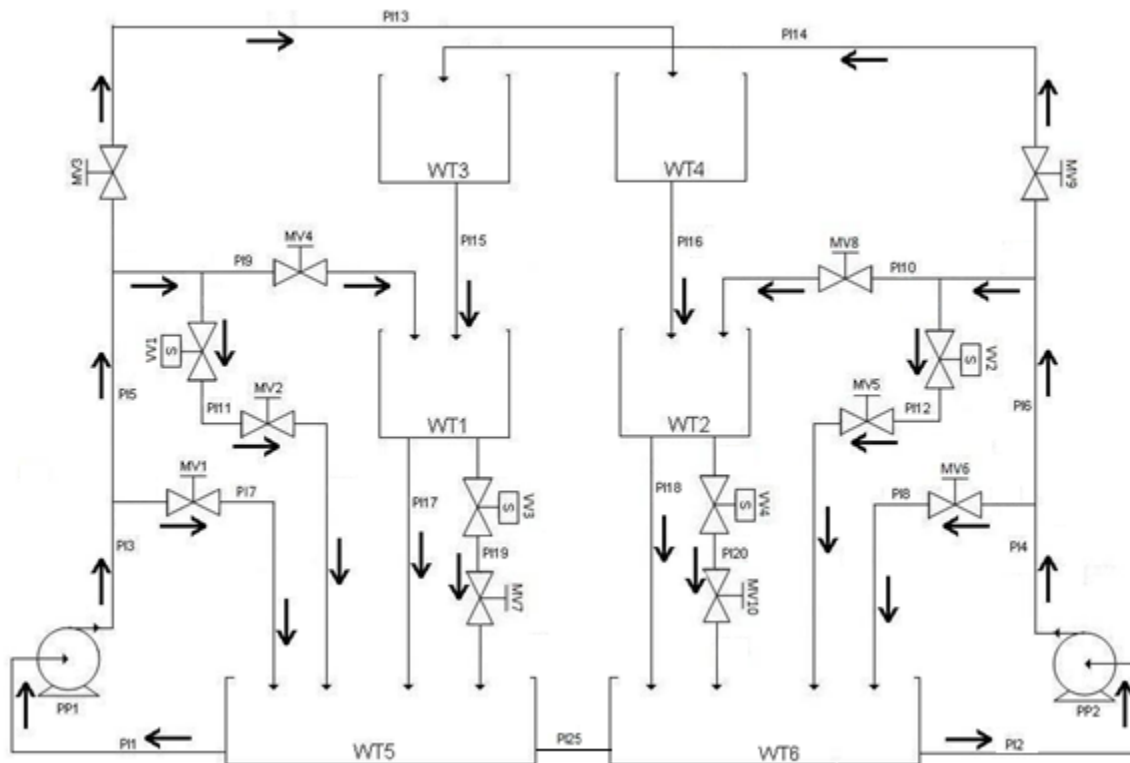


Figura 25. Diagrama de flujo de la planta

Párrafo descriptivo

En este plano se indican (por medio de flechas) los diferentes caminos que tomará el líquido al iniciar el proceso de succión de agua que será impulsada por las motobombas PP1 y PP2 desde los tanques WT5 y WT6 hacia los tanques WT1, WT2, WT3 y WT4 (Figura 25). La tubería de impulsión cuenta con dos derivaciones: una tubería bypass adaptada para que la presión generada por el proceso de succión e impulsión no dañe la tubería y una derivación en la tubería de entrada a los tanques WT1 y WT2 donde el agua podría circular restándole caudal de entrada a cada tanque. Igualmente a los tanques WT1 y WT2 se les ha adaptado una tubería de desagüe adicional que genera un mayor caudal de salida de cada tanque. Estas tuberías fueron adicionadas con el fin de generar cambios en la dinámica de la planta.

3.4.2. PLANO P&ID DE DIAGRAMA DE FLUJO Y ETIQUETADO

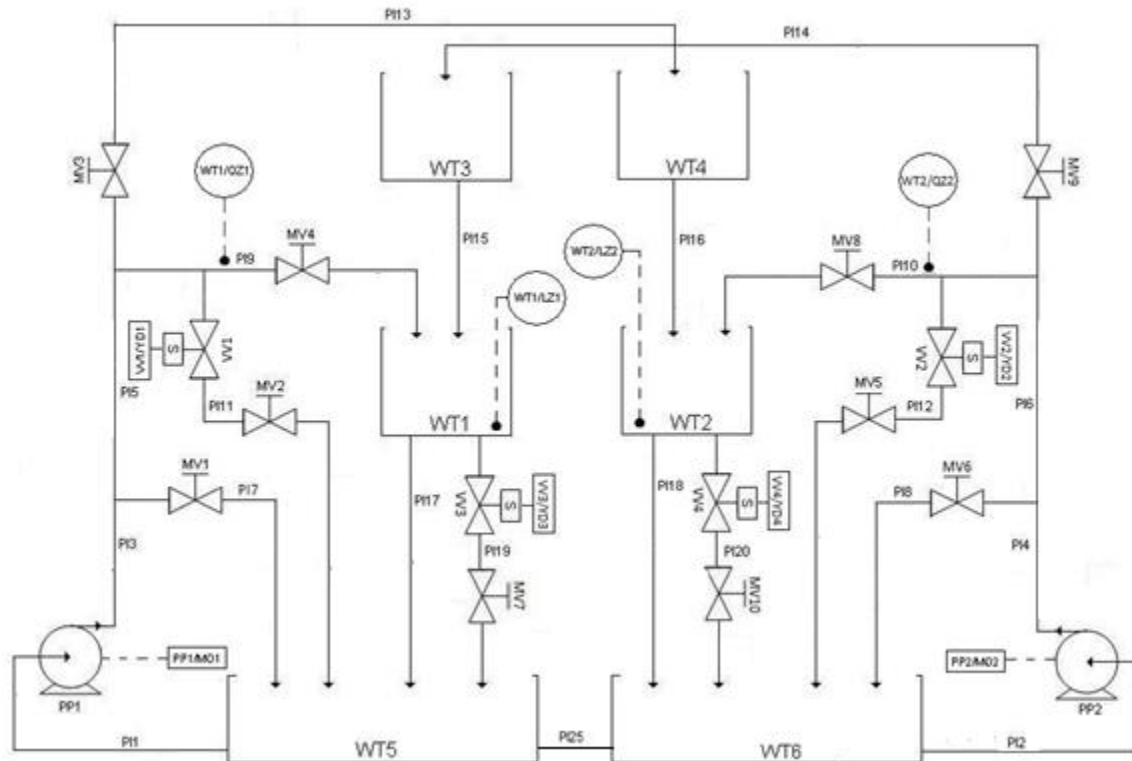


Figura 26. Diagrama P&ID

Párrafo descriptivo

En este plano se pueden identificar y ubicar sobre cada equipo, todas las señales que entran o salen de él (Figura 26). Se cuentan con 4 señales analógicas que corresponden a la lectura de los 4 sensores adaptados al sistema, dos de flujo (ubicados en las tuberías de entrada a los tanques 1 y 2) y dos de nivel (en los tanques 1 y 2) y con 6 señales discretas que corresponden a las cuatro electroválvulas adaptadas en tuberías alternas (VV1, VV2, VV3 y VV4) y al encendido de las dos motobombas PP1 y PP2.

3.4.3. PLANOS TÍPICOS DE CABLEADO

En estos planos se encuentran definidas cada una de las conexiones que se

establecieron entre el tablero de control y los instrumentos y equipos que componen la planta con el fin de ayudar a la ubicación dentro del espacio de trabajo. A continuación se enumeran los planos desarrollados y podrán ser vistos en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

1. Diagrama de lazo Tanque 1 DAQ
2. Diagrama de lazo Tanque 1 PLC
3. Diagrama de lazo Tanque 2 DAQ
4. Diagrama de lazo Tanque 2 PLC
5. Diagrama de mando señal de control
6. Diagrama de lazo electroválvulas
7. Diagrama de mando electroválvulas
8. Diagrama de potencia y mando Motor 1
9. Diagrama de potencia y mando Motor 2
10. VALIDACION DEL SISTEMA

Finalmente, diseñada la planta, se llegó a la implementación y el propósito de este capítulo es mostrar cada una de las pruebas desarrolladas para verificar todas las condiciones de diseño y simulación.

3.5 OBTENCION DE LOS PARAMETROS DE LOS CUATRO TANQUES Y DEL COEFICIENTE DEL DIVISOR DE FLUJO

Para realizar la simulación del modelo, primero se debe realizar un estudio analítico que permita encontrar la relación que existe entre el área del tanque y el área del orificio de desagüe y a partir de esta relación, definir los parámetros de los cuatro tanques.

Este estudio fue realizado en la sección de diseño de las áreas de los tanques en el capítulo 3.2 DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DE LA PLANTA.

Para encontrar los valores de las áreas de los tanques y sus desagües, se escogieron valores de T_{ao} que fueran menores o iguales a 48 s para cada tanque (valor definido en el diseño de las áreas de los tanques) con el objetivo de encontrar el valor de la relación de áreas partir de la ecuación del T_{ao} (ecuación 17 capítulo 3.2 DESCRIPCION DETALLADA DE LOS INSTRUMENTOS LA PLANTA). Luego, se seleccionaron los valores de las áreas que cumplieran con la relación de áreas definida.

Planta de Tanques Multivariable

De acuerdo a este planteamiento se calcularon las áreas de los tanques y de los orificios de desagüe para diferentes constantes de tiempo menores o iguales a 48s.

Para los tanques de área variable, se seleccionaron los valores del lado inferior, lado superior y su pendiente de acuerdo al sexto criterio de selección de los instrumentos de la planta (la pendiente es un resultado a partir de las áreas y de la altura del agua en los tanques).

Tanque	Áreas desagües cm ²	Áreas tanques cm ²	Lado superior cm	Lado inferior cm	Pendiente	Cv
T1	2.8502	...	20	8	0.4	0.86
T2	2.8502	...	14	5	0.3	0.86
T3	1.3179	200	0.57
T4	1.589	300	0.8

Tabla 2. Parámetros de los tanques

Para hallar el coeficiente del divisor de flujo, hay que considerar lo siguiente:

1. En las ramas que alimentan los tanques 1 y 2 de la planta de tanques multivariable (Figura 1) se encuentran los siguientes aditamentos: dos codos de $\frac{3}{4}$, un codo $\frac{1}{2}$, una T, una reducción en la tubería de $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{2}$, una válvula de bola; y en la tubería que alimenta los tanques superiores se hallan dos codos de $\frac{3}{4}$, una válvula de bola, la tubería es de $\frac{3}{4}$ y es 50 cm más larga que la de las ramas inferiores (tanques 1 y 2).
2. Al tener la tubería inferior mayor cantidad de aditamentos que la primera, se puede decir que las pérdidas en la tubería inferior son mayores que las pérdidas en la tubería de los tanques superiores. Las pérdidas para los diferentes aditamentos son proporcionales a alguna constante por la velocidad al cuadrado.

Pérdidas locales por accesorio

$$h_{p_l} = \sum k_i \frac{v^2}{2g} \quad (29)$$

k Coeficiente de resistencia local del accesorio
 g Gravedad

h_{p_l} Pérdidas locales por accesorio

3. Al haber un cambio de estrechamiento en la tubería se genera gran pérdida (ecuación por pérdida de estrechamiento) y el factor de fricción para este caso dependerá de la relación de las áreas.
4. Las pérdidas varían de forma cuadrática y al haber más pérdidas en la tubería de los tanques 1 y 2 que en la tubería de los tanques 3 y 4, el agua que pasa por las primeras tuberías (tanques 1 y 2) disminuye de forma cuadrática, generando una variación del coeficiente divisor de flujo de forma cuadrática con respecto al flujo de las motobombas.

Para comprobar este concepto teórico, se realizaron las siguientes pruebas:

1. Las válvulas manuales ubicadas en las tuberías de entrada de los tanques 1, 2, 3 y 4 después de los divisores de flujo (Figura 1) se abrieron a una determinada posición.
2. Se caracterizaron las motobombas a partir de la configuración de las válvulas para conocer el flujo que entregaban a los tanques a diferentes valores de frecuencia. Con los sensores de flujo ubicados en los tanques 1 y 2 se determinó el flujo de entrada a estos tanques y para determinar el caudal de entrada a los tanques 3 y 4 se aforaron, se midió el tiempo en que llegaba el agua a una altura de operación definida y se calculó el volumen en ese punto. Se sumaron los dos caudales y se obtuvo el caudal total entregado por las motobombas.
3. Se inició con la motobomba 1 que alimenta los tanques 1 y 4. Se realizaron cinco pruebas con diferentes valores de frecuencia para la motobomba. Se halló cada uno de los caudales totales entregados a los tanques y se calculó el valor de la constante de división de flujo para cada caudal. Este valor se obtuvo dividiendo el caudal de entrada al tanque 1 o 2, entre el caudal entregado por la motobomba.
4. El proceso expuesto en el punto 3, fue realizado igualmente para la otra motobomba.
5. Finalmente, se realizó una regresión donde se encontró una relación cuadrática entre el flujo y este parámetro para caracterizar el divisor de flujo (Figura 27).

$$\gamma_1 = ((F1^2) * 0.000631) - (F1 * 0.0399) + 1.1938 \quad (30)$$

$$\gamma_2 = ((F2^2) * (-0.0005)) - (F2 * 0.0201) + 0.4898 \quad (31)$$

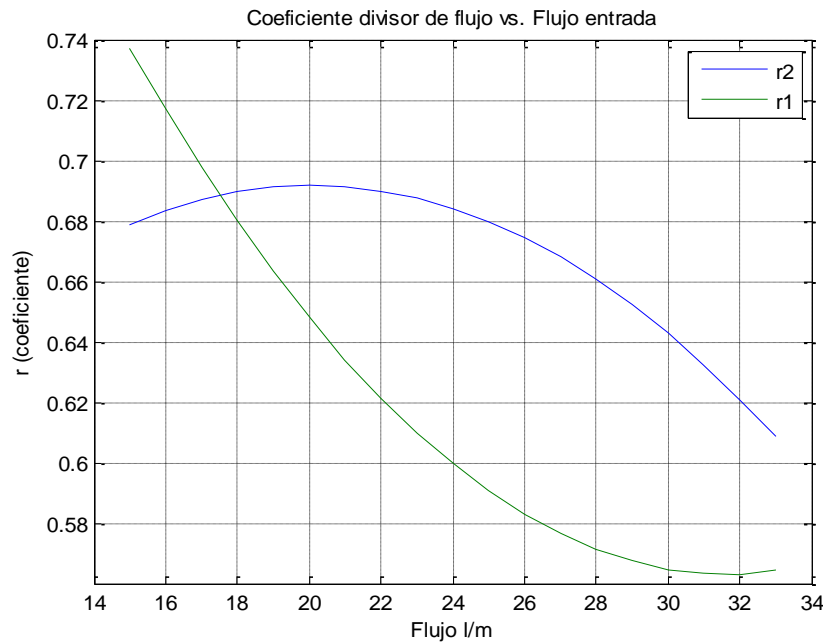


Figura 27. Grafica relación entre divisor de flujo y flujo de entrada

Como se puede observar en la grafica de la Figura 27, la experimentación permitió identificar efectivamente que existe una variación cuadrática del Coeficiente de División de Flujo (coeficiente γ) con respecto al flujo de las motobombas. Los coeficientes obtenidos son diferentes debido a que la apertura de las válvulas manuales es distinta.

El coeficiente de divisor de flujo γ_1 y γ_2 definidos en las ecuaciones 23, 24, 25 y 26 serán reemplazados por las expresiones obtenidas en este análisis (ecuaciones 30 y 31) para poder comparar el comportamiento de la planta con la simulación del modelo de los cuatro tanques.

3.6 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LOS CUATRO TANQUES

Después de obtener los parámetros de los cuatro tanques y la relación del coeficiente del divisor de flujo, se hizo la simulación del modelo matemático de la planta donde se obtuvieron las siguientes respuestas en las dinámicas de los tanques (Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31), el eje horizontal es el tiempo de respuesta de la planta en

Planta de Tanques Multivariable

segundos y el eje vertical es la altura del agua en centímetros. Se seleccionaron los datos de una de las 5 pruebas realizadas con el fin de mostrar el comportamiento real de la planta y compararlo con el modelo simulado. El resultado de las cuatro pruebas restantes, son expuestas en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Parámetros de prueba:

- Flujo de entrada 1: 31 l/m
- Flujo de entrada 2: 24,5 l/m

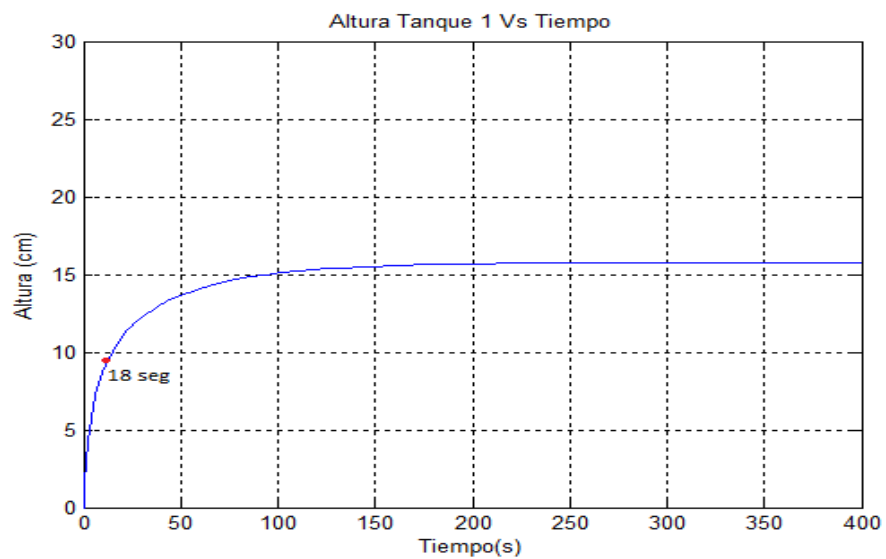


Figura 28. Curva de comportamiento Tanque 1

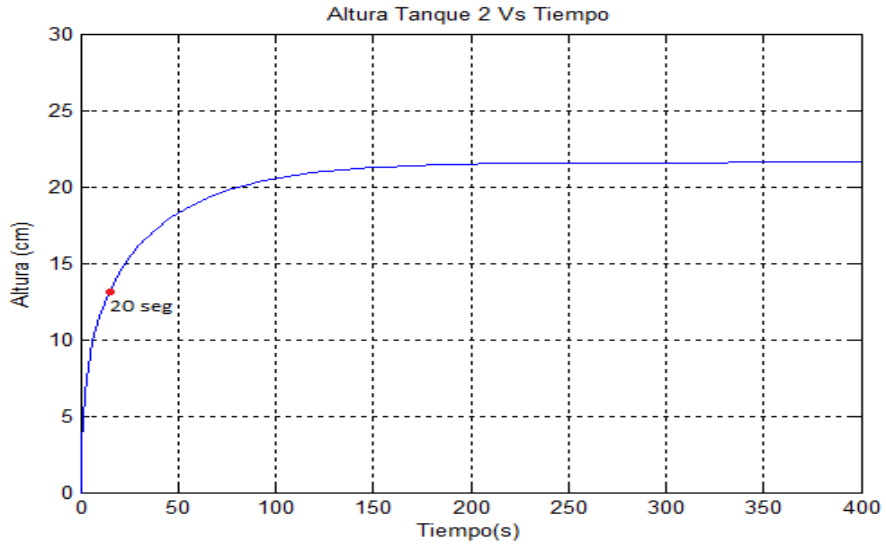


Figura 29. Curva de comportamiento Tanque 2

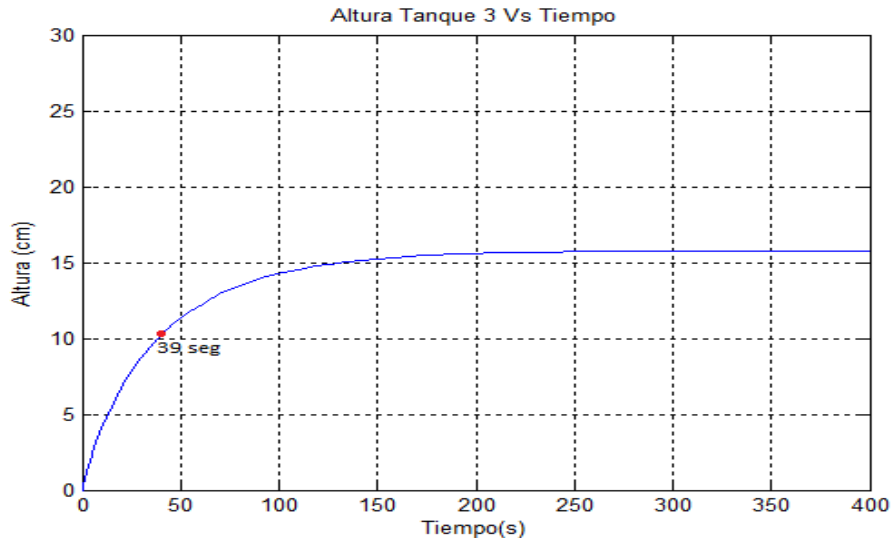


Figura 30. Curva de comportamiento Tanque 3

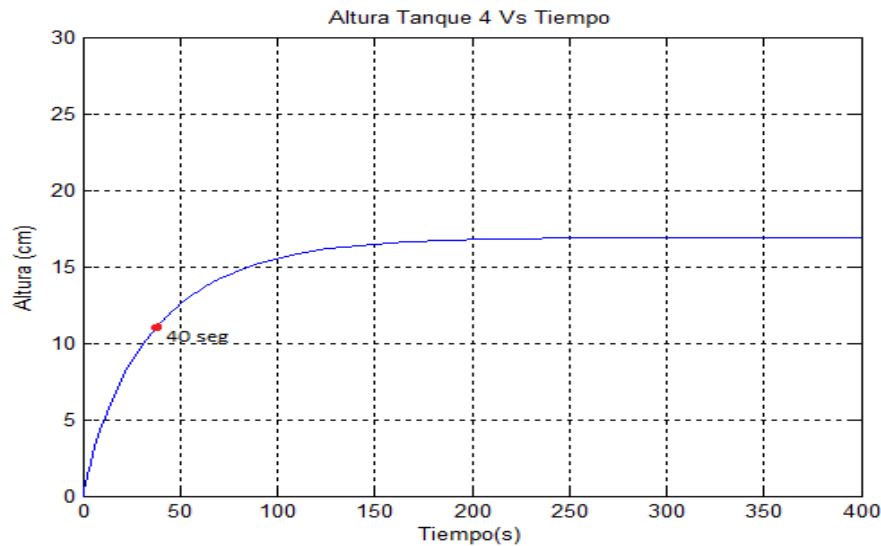


Figura 31. Curva de comportamiento Tanque 4

Análisis prueba realizada:

Al analizar las gráficas anteriores, se puede observar que para un caudal de entrada de 33 l/min para la motobomba 1 y 27 l/m para la motobomba 2 los cuatro tanques cumplen con las especificaciones de la planta establecidos en el capítulo 2.4 ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA ya que las alturas alcanzadas y los tiempos de establecimiento se encuentran dentro del rango establecido: 30 cm de altura máxima en los tanques y 4 minutos máximo de tiempo de establecimiento.

Para el tanque 1 se observa una altura 18 cm y una constante de tiempo de 18 segundos; para el tanque 2 una altura de 23 cm y una constante de tiempo de 20 segundos; el tanque 3 tiene una altura de 20,5 cm y una constante de tiempo de 39 segundos y para el tanque 4 se tiene una altura de 18 cm y una constante de tiempo de 40 segundos.

3.7 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA FÍSICA

El objetivo de estas pruebas es observar el comportamiento del sistema a partir de la variación del flujo de entrada a los tanques impulsado por las motobombas. Las pruebas consistieron en hacer variar el caudal de entrada a los tanques 1, 2, 3 y 4 y obtener los valores de alturas y tiempo de establecimiento a partir de la caracterización de las motobombas obtenidas en la sección anterior. Al igual que en las pruebas de simulación, se escogieron los mismos caudales de entrada a los tanques para poder

Planta de Tanques Multivariable

comparar el comportamiento de la dinámica del sistema. Las graficas obtenidas para los tanques 1 y 2 son generadas a partir de la lectura de los sensores de nivel ubicados en estos tanques. Las graficas para los tanques 3 y 4 se obtuvieron a partir de una lectura visual cada 10 segundos de la altura del agua en los tanques. Las graficas obtenidas fueron las siguientes:

Parámetros de prueba:

- Flujo de entrada 1: 31 l/m
- Flujo de entrada 2: 24,5 l/m

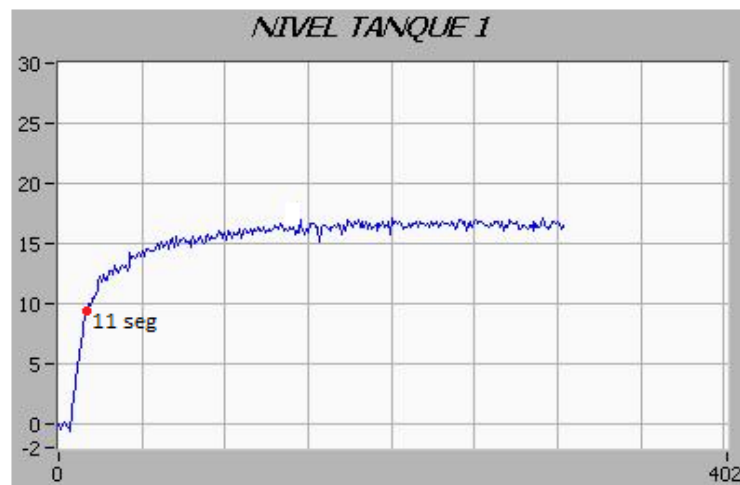


Figura 32. Curva de comportamiento real Tanque 1

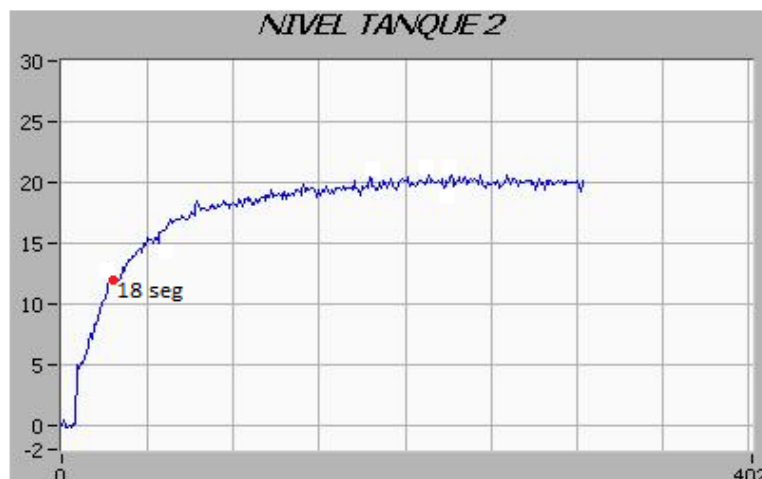


Figura 33. Curva de comportamiento real Tanque 2

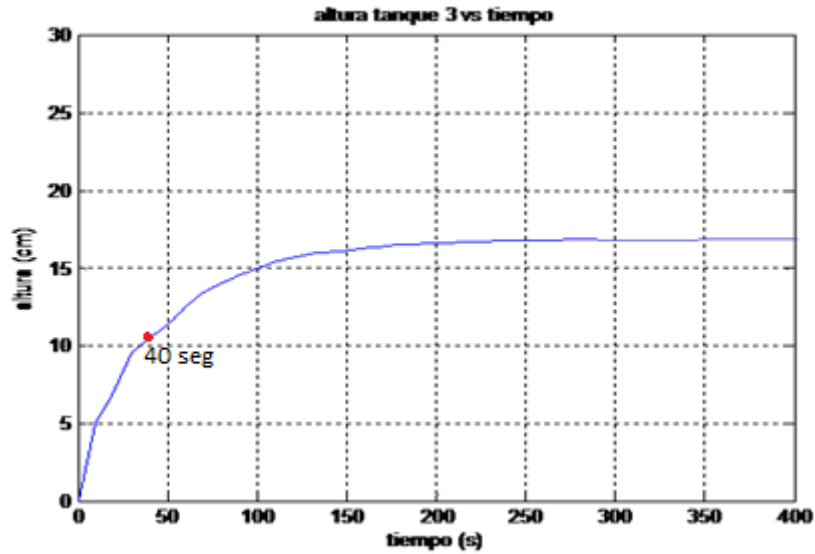


Figura 34. Curva de comportamiento real Tanque 3

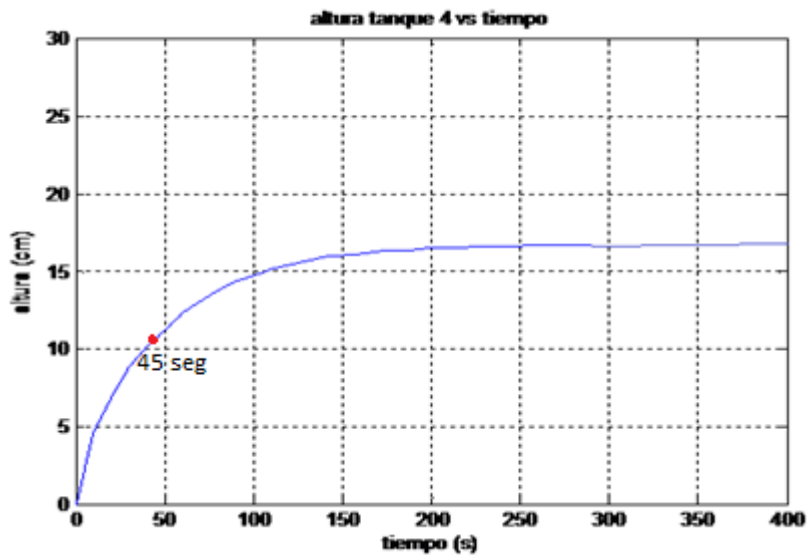


Figura 35. Curva de comportamiento real Tanque 4

3.8 COMPARACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LOS CUATRO TANQUES CON EL COMPORTAMIENTO REAL DE LA PLANTA

Como se mencionó al inicio del capítulo cuatro, para observar el comportamiento de la planta con respecto al modelo simulado y validar la planta, se muestra los resultados obtenidos para una de las pruebas y observar la dinámica de llenado de los tanques 1, 2, 3 y 4. Las otras cuatro pruebas se encuentran en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Parámetros de prueba:

- Flujo de entrada 1: 31 l/m
- Flujo de entrada 2: 24,5 l/m

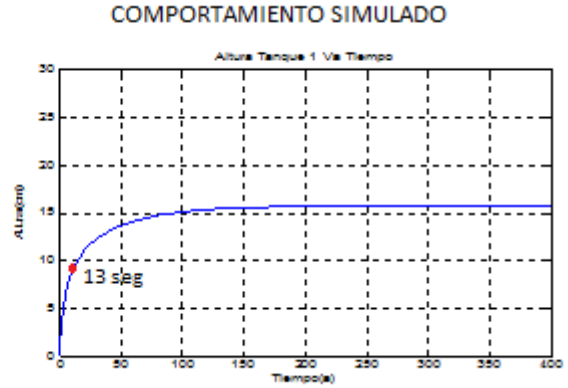
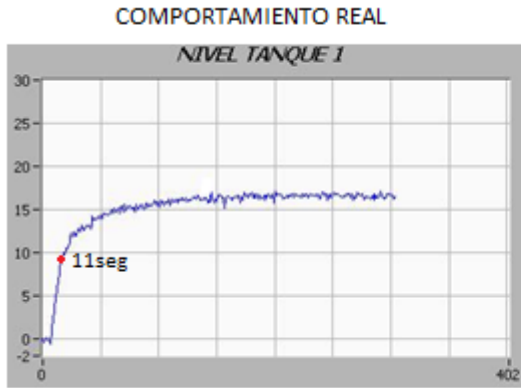


Figura 36. Prueba 1 – dinámica de comportamiento tanque 1

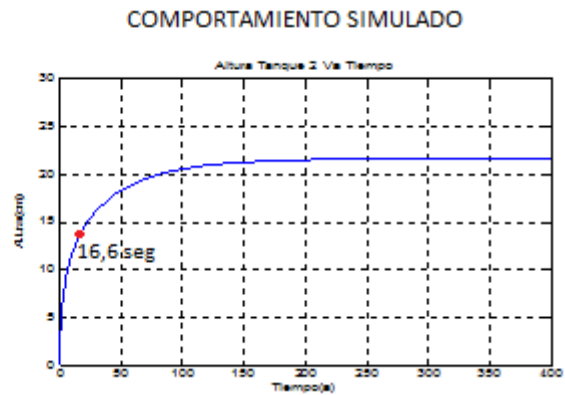
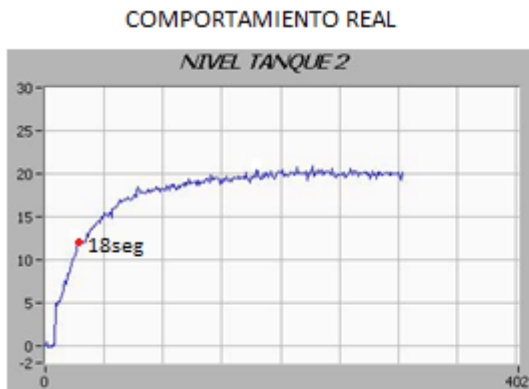


Figura 37. Prueba 1 – dinámica de comportamiento tanque 2

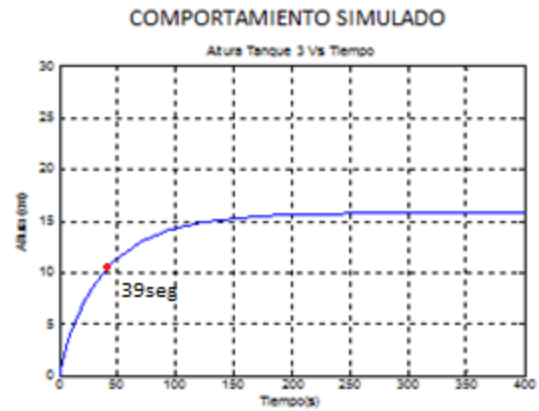
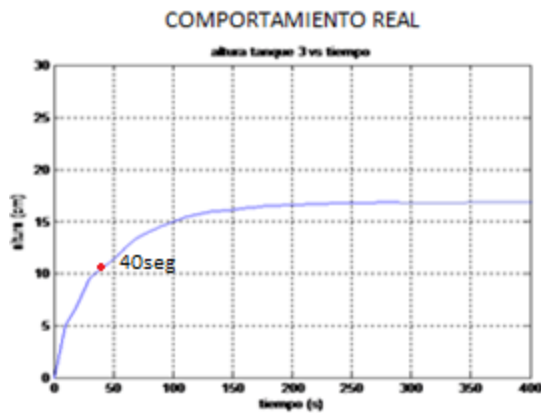


Figura 38. Prueba 1 – dinámica de comportamiento tanque 3

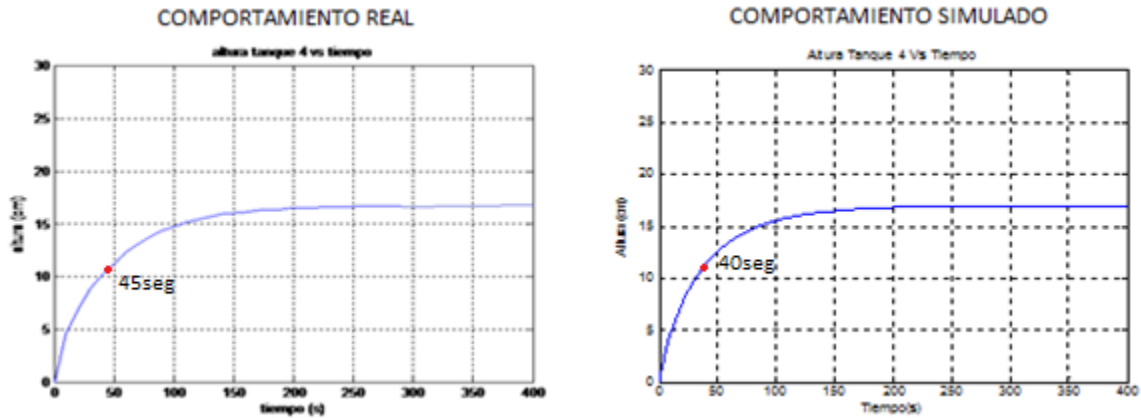


Figura 39. Prueba 1 – dinámica de comportamiento tanque 4

Como se puede observar en las graficas de la Figura 36, Figura 37, Figura 38 y Figura 39, las constantes de tiempo obtenidas experimentalmente y en simulación fueron similares con un error máximo del 9% (Figura 39). Los valores de las constantes de tiempo son las siguientes: 11 segundos para el tanque 1, 18 segundos en el tanque 2, 40 para el tanque 3 y 45 segundos para el tanque 4. Como se puede ver, al ser estos valores distintos, se cumple con el criterio de dinámica de llenado de los tanques establecido en las especificaciones de la planta (2.4 ESPECIFICACIONES DE LA PLANTA).

En cuanto a las alturas obtenidas para cada tanque, se puede observar que el comportamiento real es parecido al simulado con un error máximo entre las alturas alcanzadas en cada prueba de 1,5 cm comprobando que el modelo matemático de la planta corresponde a la planta diseñada.

CONCLUSIONES

1. El dimensionamiento de las variables que se desean medir y monitorear es importante para definir las características de los instrumentos a utilizar antes de su compra y adquisición.
2. El diseño de la planta cumplió con las especificaciones de funcionamiento planteados para el proyecto que buscaba crear una planta de tanques multivariable que ofreciera dinámicas distintas de llenado y tiempo de establecimiento.
3. Se verificó que el modelo matemático de la planta simula satisfactoriamente el comportamiento de la planta, por los resultados obtenidos en las cinco pruebas realizadas en la validación del sistema.
4. La interfaz creada en el software de LabView permitió hacer monitoreo del comportamiento de los tanques 1 y 2 durante las pruebas realizadas. Este monitoreo podrá ser tenido en cuenta para realizar posteriormente practicas de control.

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- 1.** Adicionar instrumentación a los tanques superiores de la planta para permitir el monitoreo total de la dinámica de los cuatro tanques.
- 2.** Adicionar un PLC al tablero de control para monitorear la planta a través de otro escenario de automatización. El tablero de control cuenta con todas las señales que son actualmente controladas desde una DAQ, en borneras adicionales que permitirá conectar el PLC a las variables medidas y controladas de la planta.
- 3.** Implementar control multivariable sobre los tanques de área variable (PID).
- 4.** implementar control no lineal sobre los tanques de área variable.
- 5.** Los variadores PowerFlex 4M cuentan con un puerto Ethernet. Para ampliar las prácticas en el laboratorio, se recomienda hacer el estudio para conectar los variadores por red y poder hacer control remoto de la planta.
- 6.** Usar cámaras para poder realizar el monitoreo del comportamiento de la planta y posiblemente plantear una opción nueva de control.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA. "Sistema de tres tanques: Un laboratorio virtual y remoto usando *Easy Java Simulations*" Documento PDF en línea disponible en http://espacio.uned.es/fez/eserv.php?pid=bibliuned:713&dsID=Duro_etal_C10_2005.pdf. [Consultado: septiembre de 2010].
- [2] UNIVERSIDAD DE ALMERIA. "Laboratorio Remoto para el Proceso de cuatro tanques y su aplicación en la docencia de control multivariable". Documento PDF en línea disponible en http://espacio.uned.es/fez/eserv.php?pid=bibliuned:718&dsID=Garcia_etal_C12_2005.pdf. [Consultado: septiembre de 2010].
- [3] IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 8, NO. 3, MAY 2000. "The Quadruple-Tank Process: a Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero". Documento PDF en línea disponible en <http://www.das.ufsc.br/~trofino/disciplinas/das-5131/quatro%20tanques/fourtanks.pdf>. [Consultado: septiembre de 2010].
- [4] UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN. DEPARTMENT OF CHEMICAL AND BIOMOLECULAR ENGINEERING. "A Quadruple Tank Process Control Experiment". Documento PDF en línea disponible en <http://brahms.scs.uiuc.edu/lssrl/software/quadtank.pdf>. [Consultado: septiembre de 2010].
- [5] UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA. "Experiencia de trabajo en equipo: diseño de una planta de tanques acoplados". Documento PDF en línea disponible en http://www.uco.es/organizacion/calidad/actividades_propias/pimcd/pdf/MEMORIAS/pdf/1407NA4014.pdf. [Consultado: septiembre 2010].
- [6] FERNÁNDEZ Julián, PUJAL Marcos. "Iniciación a la física". Libro en línea disponible en http://books.google.com/books?id=YITSNSPUvxwC&pg=PA261&dq=teorema+de+torricelli+fisica+libros&hl=es&ei=z18HToa8GKiu0AHp5Ji7Cw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CDAQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false. [Consultado: septiembre 2010].
- [7] FLOWLINE. "EchoPod DL14, DL24 & DL34 Series Manual". Documento PDF en línea disponible en <http://www.flowline.com/pdf/ultrasonic-level-measurement/echopod-dl14-dl24-dl34-m.pdf> [Consultado: septiembre 2010].

- [8] BANNER. "Sensores ultrasónicos Modelos U-GAGE™ T30 con salidas duales digitales". Documento PDF en línea disponible en <http://info.bannersalesforce.com/xpedio/groups/public/documents/literature/sd059.pdf> [Consultado: septiembre 2010].
- [9] GEORG FISCHER/GF SIGNET. "Signet 8550-1 Flow Transmitter". Documento PDF línea disponible en <http://www.instrumart.com/assets/108/8550man.pdf>. [Consultado: septiembre 2010].
- [10] ALLEN BRADLEY. "POWERFLEX 4M Adjustable Frequency AC Drive". Documento PDF en línea disponible en http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/22f-um001_-en-e.pdf. [Consultado: septiembre 2010].

