

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA EL ESTUDIO
DE ESTRATEGIAS DE CONTROL**

DAVID GIRALDO DURANGO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN**

2014

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA EL ESTUDIO
DE ESTRATEGIAS DE CONTROL**

DAVID GIRALDO DURANGO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director
RAFAEL ESTEBAN VÁSQUEZ MONCAYO
Doctor en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN

2014

Nota de aceptación

Firma
Nombre:
Presidente del jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Medellín, Mayo 7 de 2014

AGRADECIMIENTOS

A mi Familia.

Al Grupo de Automática y Diseño A+D, especialmente a Rafael Vásquez por su ayuda para concretar este trabajo.

A las personas que de algún modo ayudaron a que este proyecto se llevara a cabo.

Este trabajo de grado se encuentra enmarcado dentro del proyecto “Estudio comparativo de estrategias avanzadas de control en un sistema de tanques”, radicado 025B-02/13-22 y se desarrolló con la financiación del Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación - CIDI, y la dirección de laboratorios de la UPB.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. DISEÑO DEL SISTEMA	14
1.1. DISEÑO CONCEPTUAL	14
1.2. DISEÑO BÁSICO	16
1.3. DISEÑO DE DETALLE	18
2. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	25
2.1. ESTRUCTURA	25
2.2. TANQUES Y VERTEDEROS	26
2.3. TANQUE DE ACUMULACIÓN Y LÁMINAS	27
2.4. RED DE TUBERÍA	28
2.5. DISPOSITIVO PARA TIEMPO MUERTO	29
2.6. GABINETE DE CONTROL	29
CONCLUSIONES	32
BIBLIOGRAFÍA	33
ANEXOS	36
A. PLANOS DETALLADOS PARA FABRICACIÓN Y ENSAMBLE	37

B.	ARTÍCULO PUBLICADO EN INGENIAR 2013	59
C.	ANTEPROYECTO	69

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 Diseño conceptual del sistema de tanques.	16
2 Diseño básico del sistema de tanques.	17
3 Dimensiones de vertederos.	19
4 Atenuador.	20
5 Estructura.	21
6 Red de tubería.	21
7 Prototipo 1.	22
8 Prototipo 2.	23
9 Prototipo 3.	23
10 Prototipo virtual.	24
11 Estructura modificada.	26
12 Tanques en acrílico.	26
13 Vertederos con y sin empaque.	27
14 Tanque de acumulación.	28
15 Red de tubería definitiva.	28
16 Sistema de tiempo muerto.	29

17	Gabinete de control.	30
18	Módulo.	31
19	Modelo Final.	31

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Configuraciones del sistema.	16
2 Instrumentación del sistema de tanques.	18
3 Tipos de vertederos.	19

RESUMEN

En la ingeniería los equipos de laboratorio son esenciales para realizar estudios. Se realizó el diseño y la construcción de un sistema de tanques en serie compacto, reconfigurable y didáctico para ser usado en la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). El proyecto se ejecutó en dos fases: el diseño del sistema, donde se desarrolló la propuesta del módulo; y la construcción y el montaje de éste, donde se desarrolla físicamente el diseño propuesto. Se obtuvo un equipo de laboratorio que cumple con las especificaciones y características deseadas, y será una herramienta útil para el estudio de estrategias de control, tanto en actividades de docencia (en pregrado y posgrado), como en actividades de investigación y transferencia de conocimiento en la Universidad.

PALABRAS CLAVE:

Sistema de tanques, laboratorio de control, diseño de equipos de laboratorio.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería es una profesión práctica que va más allá de la teoría, es por esto que los laboratorios son una herramienta esencial. Se debe diferenciar tres tipos de laboratorios de ingeniería: de desarrollo, investigación y educativos. Los primeros permiten extraer datos para resolver y analizar puntos específicos de un diseño o un producto, los de investigación aportan al conocimiento general de un tema, y los educativos buscan que los estudiantes aprendan sobre algo que los ingenieros en práctica deberían saber, dándoles la oportunidad de experimentar y tratar con problemas y situaciones reales [1]. La constante evolución y la complejidad tecnológica han obligado a los docentes a cambiar las metodologías de enseñanza [2], lo que hace indispensable prácticas en laboratorios como una herramienta complementaria de enseñanza y aprendizaje. Además es esencial el uso de los laboratorios para investigadores, siendo un espacio donde se puede interactuar, visualizar y poner en práctica el conocimiento y donde se pueden obtener datos experimentales útiles para el desarrollo de proyectos.

En los últimos años el crecimiento industrial ha requerido la implementación de sistemas de control para estandarizar los productos y procesos, y suplir la demanda del mercado. Los sistemas de control son importantes para lograr mantener controladas las variables de un proceso y minimizar costos operacionales en la industria, proporcionando el aumento en la rentabilidad de sus productos.

Para el aprendizaje en el tema de automatización y control es conveniente el uso de equipos y sistemas industriales. Sin embargo, en general las universidades no disponen de estos, por lo que se acude al uso de equipos de laboratorio didácticos a escala, que brindan una aproximación a la realidad de los procesos industriales.

Actualmente existen universidades que cuentan con laboratorios de control automático. Algunas universidades españolas como la Universidad de León y la Universidad Nacional de Educación a Distancia han desarrollado numerosas investigaciones y proyectos acerca de laboratorios virtuales y remotos en aplicaciones de control que tiene como objetivo

mejorar el proceso educativo logrando mayor interactividad del alumno durante su aprendizaje [2, 3, 4, 5, 6, 7]. La Universidad de Kragujevac en Serbia cuenta con un laboratorio de control que puede ser operado en forma remota brindando a los estudiantes la oportunidad de su uso en cualquier momento del día, cualquier día de la semana, además el laboratorio puede ser compartido entre varias instituciones [8]. En Venezuela, la Universidad de los Andes cuenta con un laboratorio virtual que permite a los estudiantes realizar prácticas de una forma similar a como si estuviera en un laboratorio real [9].

Para el estudio y comparación de diferentes técnicas de control y métodos de sintonía de controladores, el Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) ha realizado diversos trabajos a nivel de simulación [10, 11, 12, 13, 14], algunos a nivel de implementación práctica en un módulo que se encontraba ubicado en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la institución [15, 16] el cual ya no se encuentra disponible. Este grupo ha desarrollado equipos que actualmente son usados para docencia, investigación y extensión en el área de automática, particularmente en lo que a control de movimiento se refiere [17, 18], sin embargo se ha visto la necesidad de desarrollar un módulo adecuado para el área de control de procesos.

Para un laboratorio de control automático los sistemas de tanques son equipos importantes dado que proporcionan flexibilidad y permiten diferentes tipos de configuraciones en el sistema para fines de control [3, 19, 20]. La Escuela de Ingenierías de la UPB cuenta con un área de automática para la formación académica enfocada a la ingeniería de control. Actualmente se dispone de un laboratorio de control de procesos para los estudiantes de pregrado y posgrado dotado con un sistema de tanques en serie que se encuentra obsoleto, es un montaje poco flexible, y no permite la implementación de diferentes técnicas de control o la reconfiguración del proceso. Se han realizado trabajos de grado relacionados con el diseño de sistemas de tanques en serie [21], sin embargo se ha visto la necesidad de desarrollar una planta adecuada para esta área.

El proyecto “Estudio comparativo de estrategias avanzadas de control en un sistema de tanques” desarrollado por el Grupo de Automática y Diseño A+D requiere la fabricación de un equipo de laboratorio que cuente con componentes e instrumentación industrial. Para abordar este problema se propuso el diseño y construcción de un equipo que sirva para fines de investigación y docencia en el área de automática de la Escuela de Ingenierías de la UPB. El sistema será útil y de apoyo para los docentes de pregrado

porque les permitirá realizar diferentes prácticas con los estudiantes, en las cuales se afianzarán los conocimientos teóricos y posibilitará simular diferentes condiciones de operación. Los estudiantes de posgrado podrán poner en práctica diferentes técnicas de control clásicas y avanzadas, útiles para sus estudios. El proyecto contribuirá con el fortalecimiento de las líneas de automatización y teoría de control del Grupo A+D, lo que permitirá que se aumente la capacidad de producción científica y la transferencia de conocimiento.

El desarrollo de este trabajo de grado fortalece la formación de ingenieros íntegros brindando la posibilidad de innovar, crear e investigar, permitiendo a su vez que éstos se enfrenten a la concepción, diseño, implementación y operación de procesos y sistemas, puntos importantes para procesos de autoevaluación y acreditación internacional basados en metodologías como ABET y CDIO [22]. Adicionalmente, ofrecerá a diferentes ingenierías, la posibilidad de ponerse a tono con tendencias curriculares contemporáneas, particularmente en el cumplimiento de las *outcomes* b, c, d, e y k propuestas por ABET [23].

1. DISEÑO DEL SISTEMA

Se presenta la forma en que se afronta la etapa de diseño del módulo de laboratorio. Esta fase se desarrolló en tres etapas: diseño conceptual, diseño básico y diseño de detalle, donde se obtuvo un prototipo virtual que permitió verificar los requerimientos de diseño antes de pasar a la construcción y ensamble del equipo.

1.1. DISEÑO CONCEPTUAL

En esta etapa de diseño se logra identificar la necesidad y se hace un estudio del estado del arte. También se obtienen datos cualitativos y cuantitativos que permiten definir una solución al problema planteado.

Definición del problema

Para determinar la configuración deseada del sistema se reunió un grupo de potenciales usuarios, los cuales aportaron sus conocimientos y plantearon sus necesidades. Con esto se obtuvo un conjunto de características y requerimientos que permitieron acotar el problema y dar un inicio sólido para el diseño del equipo, además limitó la selección de los tipos de plantas usadas para el estudio de sistemas de control.

Tras analizar los requisitos básicos y las características deseadas para el equipo se llegó a que el diseño debía suplir las siguientes necesidades:

- Contar con instrumentación industrial.
- Medición de las variables controladas, manipuladas, y perturbadoras.
- Permitir diferentes configuraciones para la dinámica del sistema:
 - Orden uno, orden dos y orden tres.

- Comportamiento lineal y no lineal.
- Tiempo muerto.
- Usar diferentes tipos de controladores industriales.
- Posibilitar la implementación de diferentes estrategias de control.
- Didáctico, con materiales de construcción aptos para la visualización.
- Compacto con posibilidad de transporte.

Estudio de la solución

En la literatura se encuentra que los sistemas de tanques tienen presencia importante en los laboratorios de control automático dada su flexibilidad y los diferentes tipos de configuración que puede tener una planta [3, 19, 20]. Es por esto que se decide realizar un sistema de tanques en serie, didáctico, compacto y reconfigurable, que cuente con una instrumentación robusta y necesaria para poner en práctica diferentes estrategias de control.

En la Figura 1 se puede observar un boceto con el diseño conceptual del sistema. La solución que se propone cuenta con dos lazos de control que llevan agua desde un tanque de almacenamiento hasta dos tanques que se encuentran en serie. El primer lazo es el que se controla, y llega al primer tanque (tanque superior). El segundo lazo es para agregar perturbaciones al sistema, y puede descargar agua tanto en el primer tanque como en el segundo, ambos lazos cuentan con un transmisor de flujo. El lazo principal (controlado) tiene una válvula de control, mientras que el lazo secundario (perturbador) cuenta con válvulas de apertura rápida. El segundo tanque tiene un transmisor de nivel, mientras que el primero tiene dos transmisores y cuenta con un sistema que permite dividirlo en dos tanques interactuantes o usarlo como un solo tanque de menor tamaño. Esta división permite aumentar el número de configuraciones posibles del sistema, las cuales se presentan en la Tabla 1.

El tiempo muerto se incluye al sistema con un medio removible que genera un retardo en el flujo y sale desde el primer tanque hacia el segundo. Las no linealidades se incluyen con el diseño de vertederos de diferentes geometrías y tamaños a través de los cuales sale el fluido de los tanques.

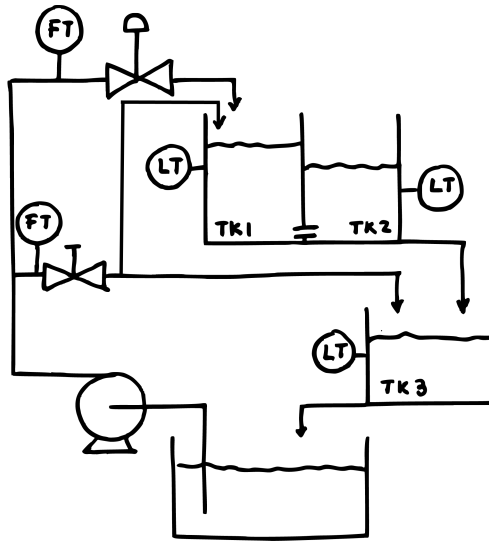


Figura 1. Diseño conceptual del sistema de tanques.

Tabla 1. Configuraciones del sistema.

Configuración	Orden del sistema
1 tanque grande	1
1 tanque pequeño	1
2 tanques grandes en serie	2
2 tanques pequeños interactuantes	2
1 tanque pequeño y 1 tanque grande en serie	2
2 tanques pequeños interactuantes y 1 tanque grande en serie	3

1.2. DISEÑO BÁSICO

Luego de definir la configuración del sistema se pasa al diseño básico que permite dimensionar y posicionar los elementos del módulo. Se evaluaron diferentes opciones para lograr determinar los componentes de acuerdo a criterios como material, tipo de conexión, costo y seguridad, entre otros.

Instrumentación

La Universidad contaba con una bomba y una válvula de control alrededor de las cuales se dimensionaron los demás elementos, generando una restricción en la selección de estos. Se dispone de una bomba Pedrollo CP620D que proporciona un caudal máximo de $6 \text{ m}^3/\text{h}$, y una válvula Spirax-Sarco LEA31 con un coeficiente de caudal $C_v = 7.5 \frac{\text{gpm}}{\sqrt{\text{psi}}}$ dotada con un actuador neumático PN 9120E y un posicionador SP5000. Teniendo en cuenta estas condiciones se seleccionaron los elementos comerciales y se realizó un diseño aproximado de los que serían fabricados. La Figura 2 muestra un diseño base del sistema realizado como punto de partida para luego evolucionar en el diseño detallado.

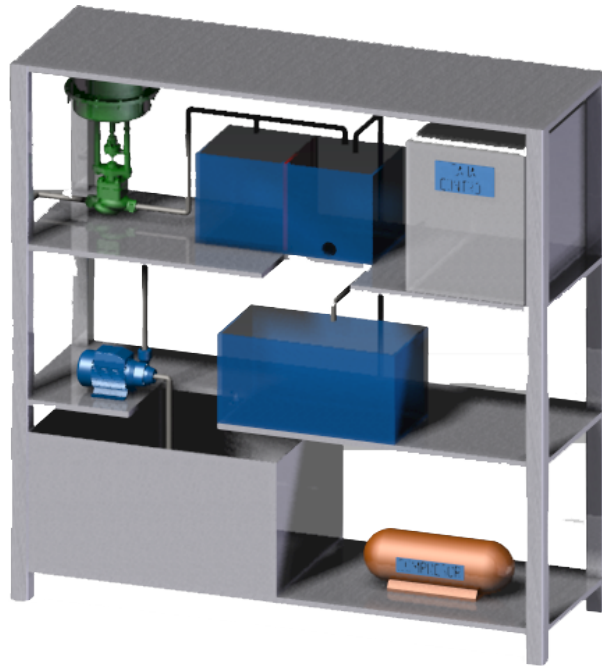


Figura 2. Diseño básico del sistema de tanques.

Para seleccionar la instrumentación se contó con la ayuda de expertos en el tema de control de procesos, la cual se hizo con base en los datos nominales de la bomba y la válvula de control disponibles. Se seleccionaron tres transmisores de presión diferencial Siemens Sitrans P DS III para ser ubicados en cada uno de los tanques (variables controladas), y dos transmisores electromagnéticos de flujo Siemens Sitrans MAG 5100W que se instalaron uno en la tubería principal (variable manipulada) y el otro en la secundaria (variable perturbadora). Se seleccionó un compresor KTC 431-2525 dedicado exclusivamente a la válvula de control, y un variador de velocidad Yaskawa J1000 para

la bomba. En la Tabla 2 se presenta la instrumentación del sistema de tanques.

Tabla 2. Instrumentación del sistema de tanques.

Elemento	Rango	Marca	Modelo
Bomba	0–6 m ³ /h	Pedrollo	CP620D
Válvula de control (lineal)	$C_v=7.5 \frac{\text{gpm}}{\sqrt{\text{psi}}}$	Spirax-Sarco	LEA31
Actuador neumático	20 mm	Spirax-Sarco	PN9120E
Posicionador	4–20 mA	Spirax-Sarco	SP5000
Transmisor de nivel	Variable	Siemens	SITRANS P DSIII
Transmisor de flujo	0–10 m/s	Siemens	SITRANS MAG5100W
Compresor	7 cfm	KTC	431–2525

1.3. DISEÑO DE DETALLE

Luego de la selección de los componentes comerciales del sistema, se hace un análisis de los elementos a fabricar, como los tanques y vertederos, y se dispone a diseñar la estructura. En este paso del proceso de diseño se define además la conexión física de los componentes, para esto se hace un proceso iterativo hasta llegar al diseño final que satisface las necesidades planteadas en el diseño preliminar.

Dimensionamiento de vertederos

Se dimensionaron vertederos lineales y no lineales intercambiables para ambos tanques teniendo en cuenta el caudal máximo que puede proporcionar la bomba. La Tabla 3 especifica los tipos de vertederos, según la relación entre el caudal de salida Q , y altura del líquido en el vertedero H [24]. La Figura 3 muestra las dimensiones y formas de los vertederos calculados (dimensiones en mm).

Tabla 3. Tipos de vertederos.

Tipo	Ecuaciones teóricas
Proporcional	$Q = K L \sqrt{a}(H + 5a/8)$
Triangular	$Q = 1.4H^{5/2}$
Rectangular	$Q = 1.838(L - (2H)/10)H^{3/2}$
Circular	$Q = 1.518D^{0.693}H^{1.807}$

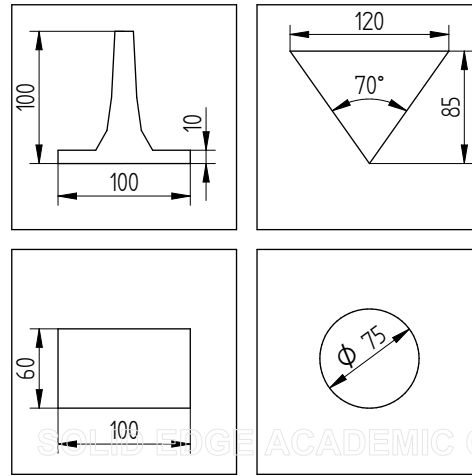


Figura 3. Dimensiones de vertederos.

Dimensionamiento de tanques

Para definir la altura de los tanques se tuvo en cuenta el rango del transmisor de presión diferencial y la altura de los vertederos. Los tanques fueron construidos en acrílico transparente para mejorar la visualización del proceso.

Es importante que el agua que llega a los tanques no genere perturbaciones en la superficie. Para lograr esto se diseñaron atenuadores internos en cada tanque, calculando el caudal que pasa a través de estos con el fin de evitar que el agua se rebose, usando la relación $Q = C_d A \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$. La Figura 4 ilustra este diseño.

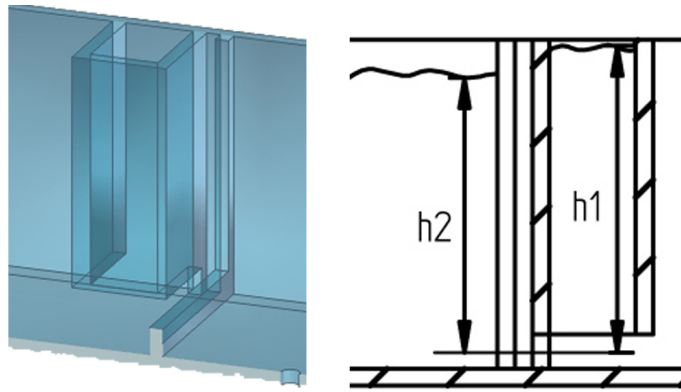


Figura 4. Atenuador.

Para el tanque de almacenamiento se calculó el volumen de agua que cabe en el sistema y se supuso que los tanques de acrílico estaban totalmente llenos. De este modo se encuentra el volumen mínimo que debe almacenar este tanque para que el sistema funcione correctamente.

Estructura

Se bosquejaron diferentes configuraciones de la estructura hasta llegar a una que fuera rígida y en la cual se pudieran ubicar los elementos que conforman el sistema. La estructura final tiene tres niveles. En el nivel inferior se encuentra ubicado el tanque de acumulación de agua y un gabinete donde se ubica el compresor y diferentes accesorios del sistema como son los vertederos, mangueras, entre otros. En el nivel del medio se ubica uno de los tanques de acrílico. En el superior se ubica el otro tanque de acrílico y el gabinete de control, en el cual se encuentran los elementos eléctricos, el variador de velocidad, el PLC y el controlador industrial Foxboro. La estructura se construye en perfiles de aluminio extruido, ya que es un material ligero, de buena resistencia y que presenta una apariencia visualmente agradable, además este tipo de perfiles son modulares y permiten hacer fácilmente modificaciones en la estructura. La Figura 5 muestra el diseño de la estructura.

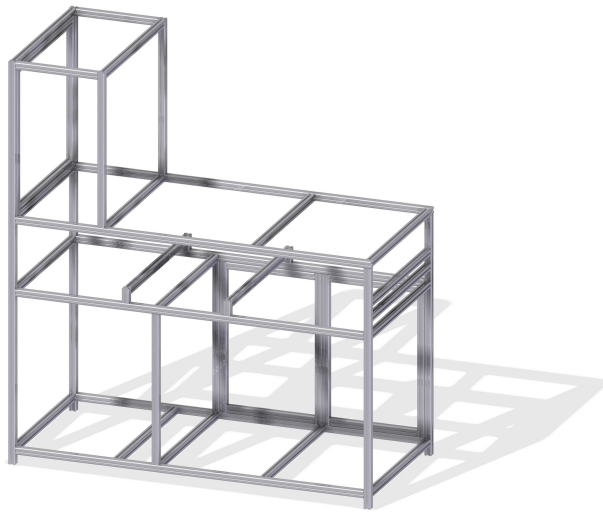


Figura 5. Estructura.

Tubería

Los diámetros de las tomas de la bomba y el sensor de flujo son de 25.4 mm (1 in) y los de la válvula de control son de 19.05 mm (3/4 in), por lo que se decide usar tubería de PVC de 25.4 mm (1 in) y 12.7 mm (1/2 in), empleando reducciones dependiendo de la necesidad. La Figura 6 esquematiza la red de tubería.

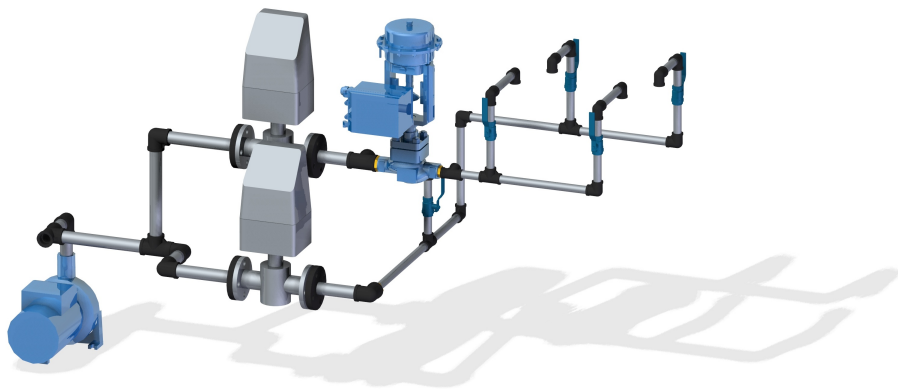


Figura 6. Red de tubería.

Gabinete de control

El diseño del gabinete se hizo conjuntamente con un candidato a maestría que hace parte del proyecto. Los componentes principales del gabinete son un controlador, un variador de velocidad, una pantalla y la conexión eléctrica de estos elementos con los demás componentes del módulo. Se pensó en hacer dos de las paredes que cubren el gabinete en acrílico transparente para permitir la visualización sin necesidad de abrirlo y las demás paredes en lámina de acero.

Prototipo virtual

Para obtener el modelo final se hicieron varias iteraciones, realizando correcciones y mejoras en cada una de ellas hasta llegar a satisfacer la necesidad planteada. Las Figuras 7, 8 y 9 muestran la evolución en el diseño del módulo.

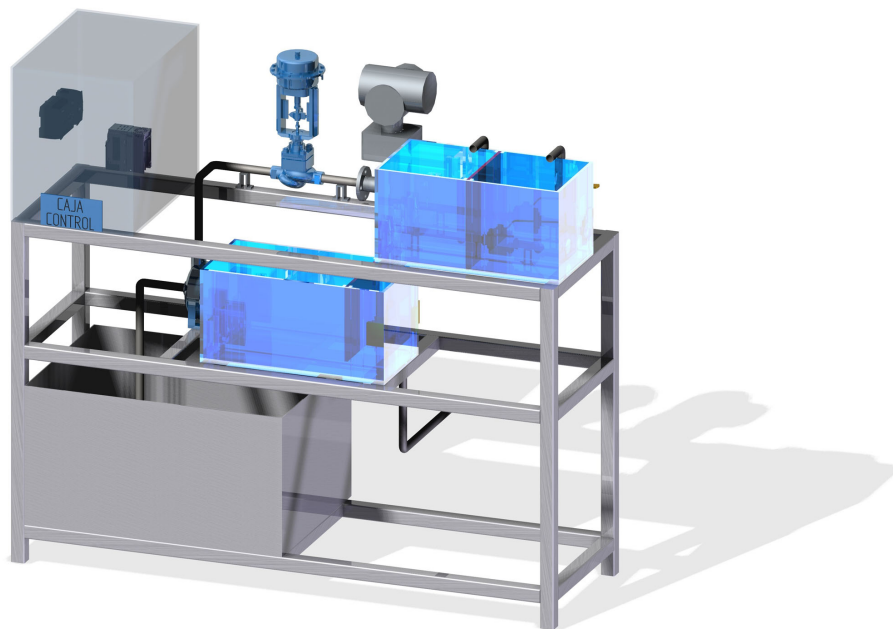


Figura 7. Prototipo 1.

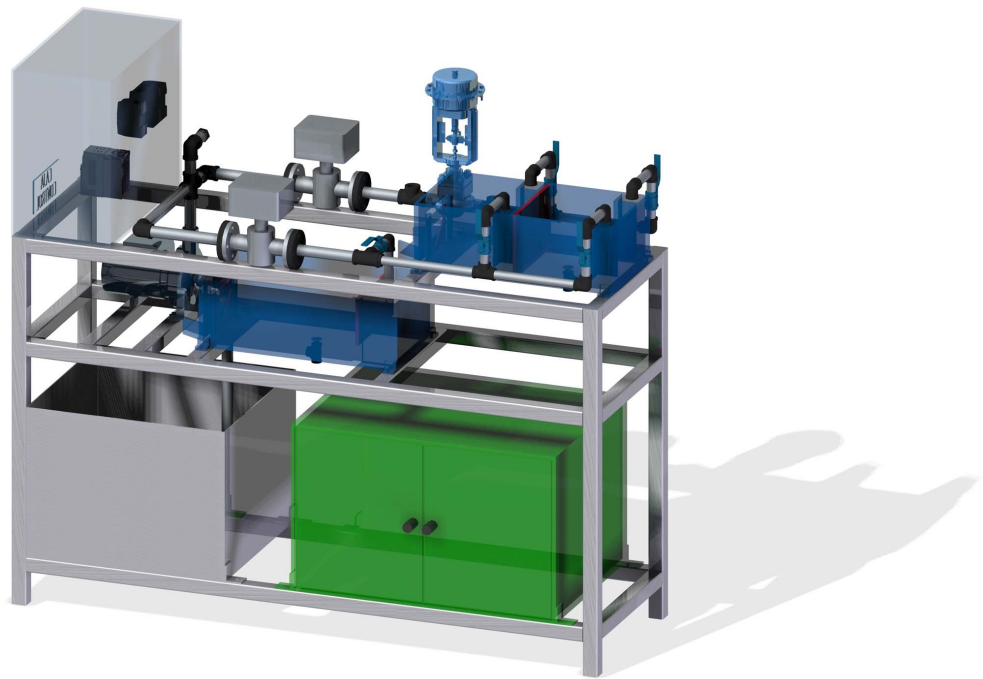


Figura 8. Prototipo 2.

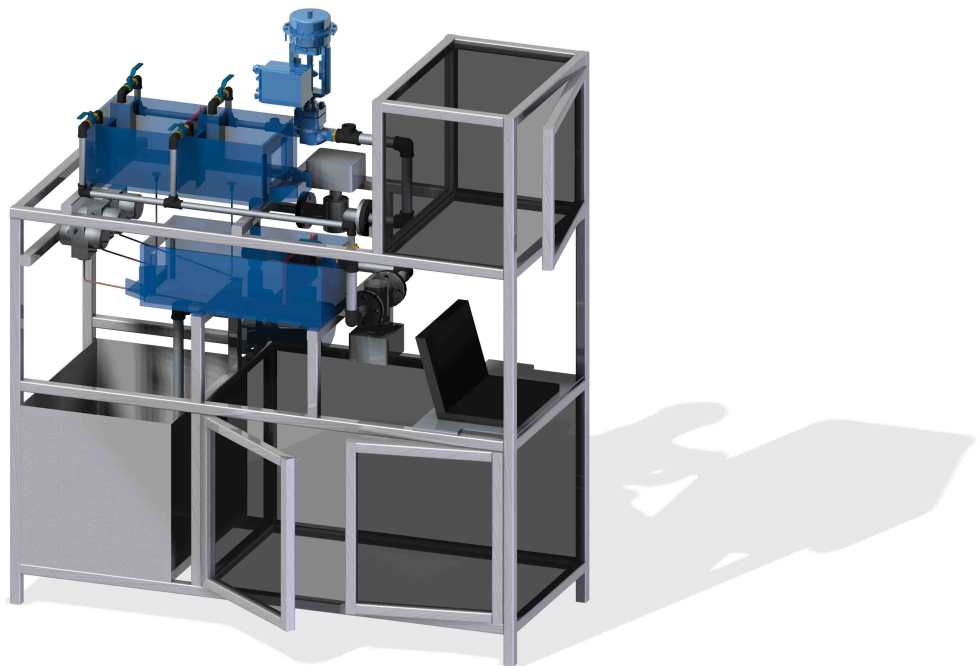


Figura 9. Prototipo 3.

Con el sistema definido se realizó un prototipo virtual mediante un programa de diseño asistido por computador CAD, SolidEdge®. Dicho prototipo permitió verificar dimensiones y visualizar posibles problemas antes de la manufactura. La Figura 10 muestra el prototipo con todos los elementos del sistema.

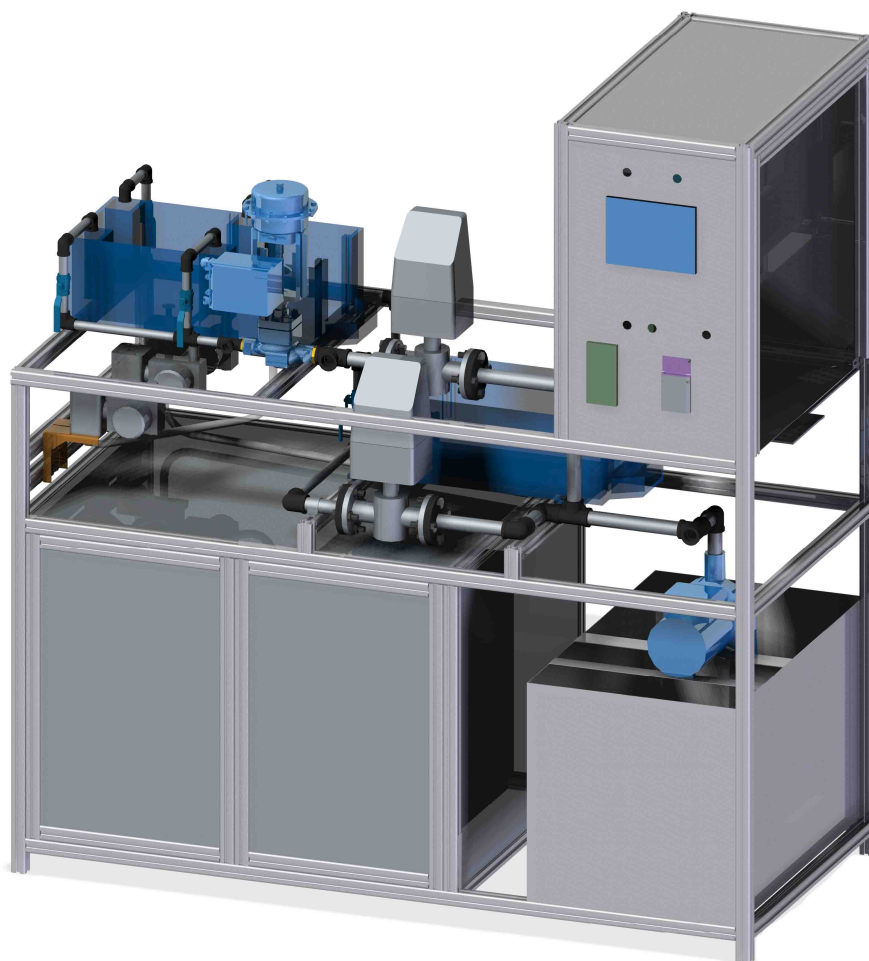


Figura 10. Prototipo virtual.

2. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

Para la construcción del módulo se fabrican algunos elementos y otros se mandan a elaborar de acuerdo a los planos y especificaciones. Estas dos etapas se desarrollan simultáneas, en el transcurso de éstas se modifican algunos elementos por diversos factores como buscar optimizar espacios, dar mejor soporte a elementos, rediseño de elementos, entre otros. Los cambios en el módulo se retroalimentaron en el prototipo virtual y se actualizaron los planos que lo requerían.

La dirección de laboratorios de la Universidad proporcionó un espacio en el laboratorio de máquinas térmicas para realizar el ensamble del módulo.

2.1. ESTRUCTURA

La perfilería que se decide usar para la estructura que soporta el sistema es de la marca MiCRO Automación y se eligió por ser modular y por contar con una amplia gama de accesorios que facilita el montaje, además permite ensamblar otros elementos de forma fácil y confiable. Los perfiles y elementos de la marca los proporcionó la empresa MICRO PNEUMATIC S.A., la cual entregó los perfiles a la medida requerida de acuerdo a los planos y listos para ser ensamblados.

Durante la construcción del módulo se realizaron modificaciones en la posición de algunos elementos cambiando así la forma en la estructura, por consecuencia fue necesario maquinar algunos perfiles lo que generó una estructura nueva, en la Figura 11 se muestra la estructura con las modificaciones realizadas. Fue necesario darle nivel al módulo para garantizar buena lectura de la instrumentación, para esto se emplearon apoyos graduables en la base de la estructura.

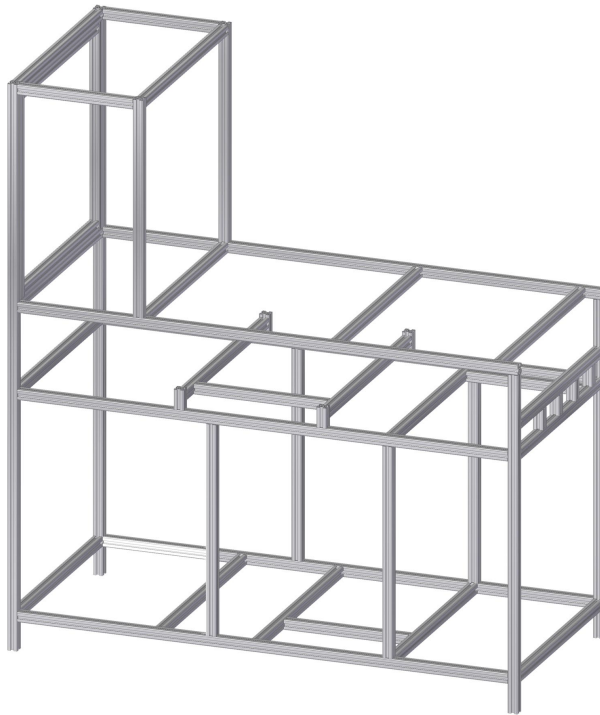


Figura 11. Estructura modificada.

2.2. TANQUES Y VERTEDEROS

Los tanques en acrílico se fabricaron en la empresa Acryam y se construyeron de acuerdo a las especificaciones de los planos generados a partir del prototipo virtual. Fueron fabricados en lámina de acrílico transparente para poder observar a través de ellos, con espesor de 10 mm con el fin que fueran robustos. En la Figura 12 se aprecian los tanques.

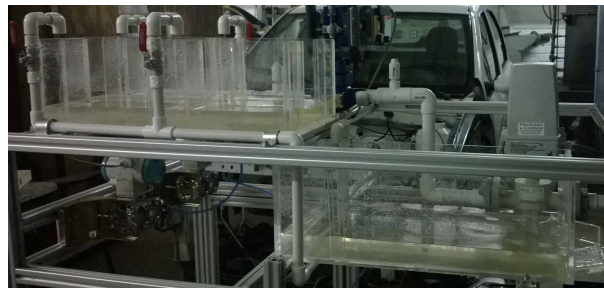


Figura 12. Tanques en acrílico.

Por medio de la misma empresa se cortaron los vertederos, la lámina que divide el primer tanque, la lámina atenuadora del segundo tanque y dos láminas para el gabinete de control. Alrededor de los vertederos se puso un empaque de caucho en U para evitar filtración en la interfaz tanque-vertedero. La Figura 13 muestra dos vertederos en acrílico, uno sin el empaque de caucho y otro con éste.

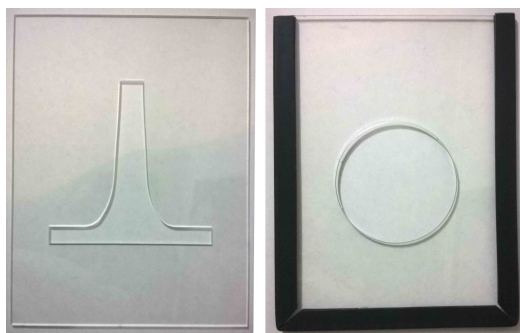


Figura 13. Vertederos con y sin empaque.

2.3. TANQUE DE ACUMULACIÓN Y LÁMINAS

Los elementos que se necesitan en acero son el tanque de acumulación y las platinas que cubren el gabinete de control. Estos elementos se fabricaron con la empresa Láminas y Cortes, cortados y fabricados de acuerdo a especificaciones. Para evitar la corrosión de estos elementos se pintaron con pintura electroestática, tal como se puede ver en la Figrua 14. El tanque de acumulación cuenta con un drenaje en la parte inferior para facilitar su vaciado.



Figura 14. Tanque de acumulación.

2.4. RED DE TUBERÍA

La tubería se cortó en el laboratorio de la Universidad de acuerdo con las dimensiones. Ésta se pegó con cemento solvente especial para PVC, la instrumentación se ensambló con accesorios roscados de PVC. Fue necesario hacer cambios en la red de tubería, que permitieron reducir la longitud de algunos tramos y soportar mejor la tubería y la instrumentación sobre la estructura de aluminio. La Figura 15 muestra el diseño final de la red de tubería.

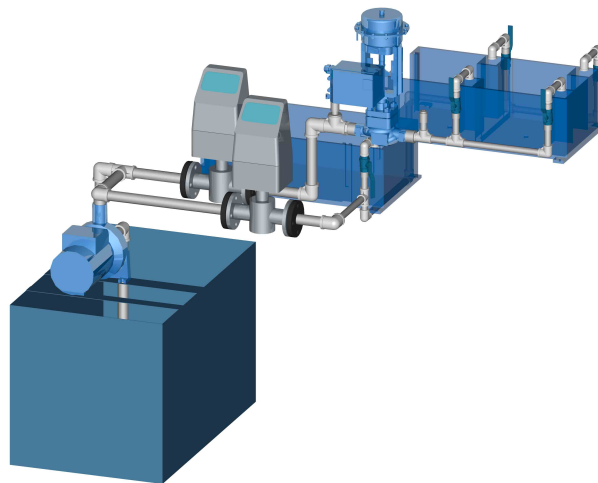


Figura 15. Red de tubería definitiva.

En la toma de agua del tanque de acumulación se dispuso una válvula cheque, lo que permite retener agua en el tramo de tubería de este tanque a la bomba eliminando la necesidad de cebar la bomba cada vez que se vaya a encender el equipo.

2.5. DISPOSITIVO PARA TIEMPO MUERTO

Con el fin de generar un retardo entre el momento en que se produce un cambio en el sistema y el momento en el que se muestra la respuesta a este cambio, se fabricó un dispositivo que prolonga el tiempo de descarga del fluido de un tanque al otro. Éste consiste en una lámina de acrílico con un orificio circular al que se le acopló un tramo de tubería de PVC, como se muestra en la Figura 16. El dispositivo cuenta con una unión universal que permite usar tramos de diferentes longitudes logrando obtener diversos tiempos muertos.

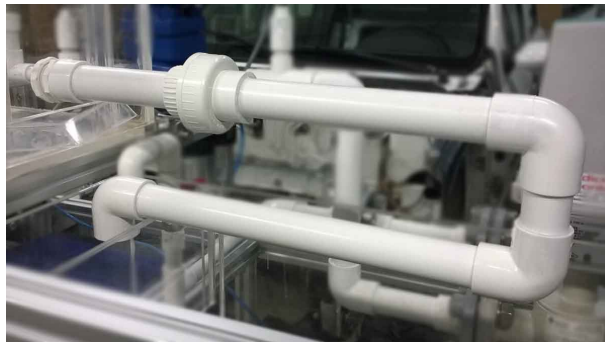


Figura 16. Sistema de tiempo muerto.

2.6. GABINETE DE CONTROL

El montaje del gabinete de control y la conexiones entre la instrumentación las realizó el candidato a maestría Carlos Rodríguez, el cual hace parte del proyecto. En la Figura 17 se observa el gabinete de control.



Figura 17. Gabinete de control.

Al finalizar la etapa de construcción y montaje se realizaron pruebas del módulo para verificar que los elementos funcionaran correctamente y se realizaron los ajustes pertinentes. La Figura 18 muestra el módulo en su construcción y la Figura 19 muestra el modelo virtual obtenido luego de retroalimentar el diseño con la fabricación y montaje del sistema.



Figura 18. Módulo.

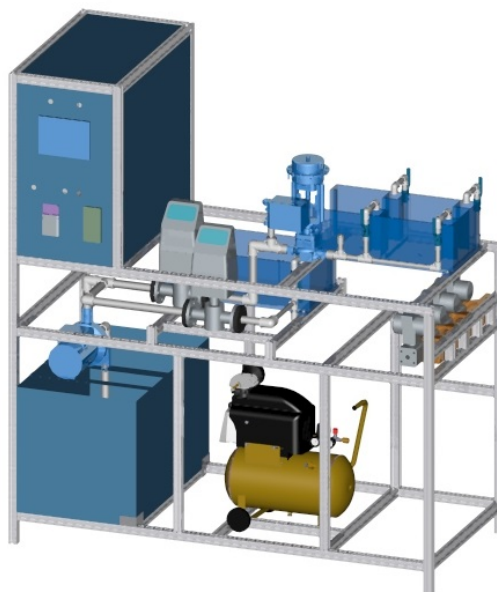


Figura 19. Modelo Final.

CONCLUSIONES

Se realizó el diseño y construcción de un sistema de tanques en serie, para el área de automática de la Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín.

Se logró apreciar el gran paso que existe entre el diseño y la construcción, cuando se realiza la etapa de diseño de algún proyecto se planea hacer algo siguiendo pasos, pero cuando llega la parte de construirlo se presentan problemas que no se logran prever en el diseño y que se deben afrontar para poder seguir con el desarrollo del proyecto. Este trabajo fué una experiencia enriquecedora ya que durante el desarrollo de las asignaturas del programa no se realizan proyectos de tal magnitud, importantes para conectar la vida académica con la laboral.

El área de control de procesos quedó dotada con un módulo de tanques en serie compacto, reconfigurable y didáctico, que podrá ser usado por estudiantes, docentes e investigadores de la Universidad. El equipo fue construido con materiales resistentes y con instrumentación robusta buscando que sean duraderos.

El módulo será una herramienta importante para la producción científica de los grupos de investigación de la Universidad. También se podrá usar en la docencia para hacer prácticas en las áreas de instrumentación y fluidos, entre otras.

BIBLIOGRAFÍA

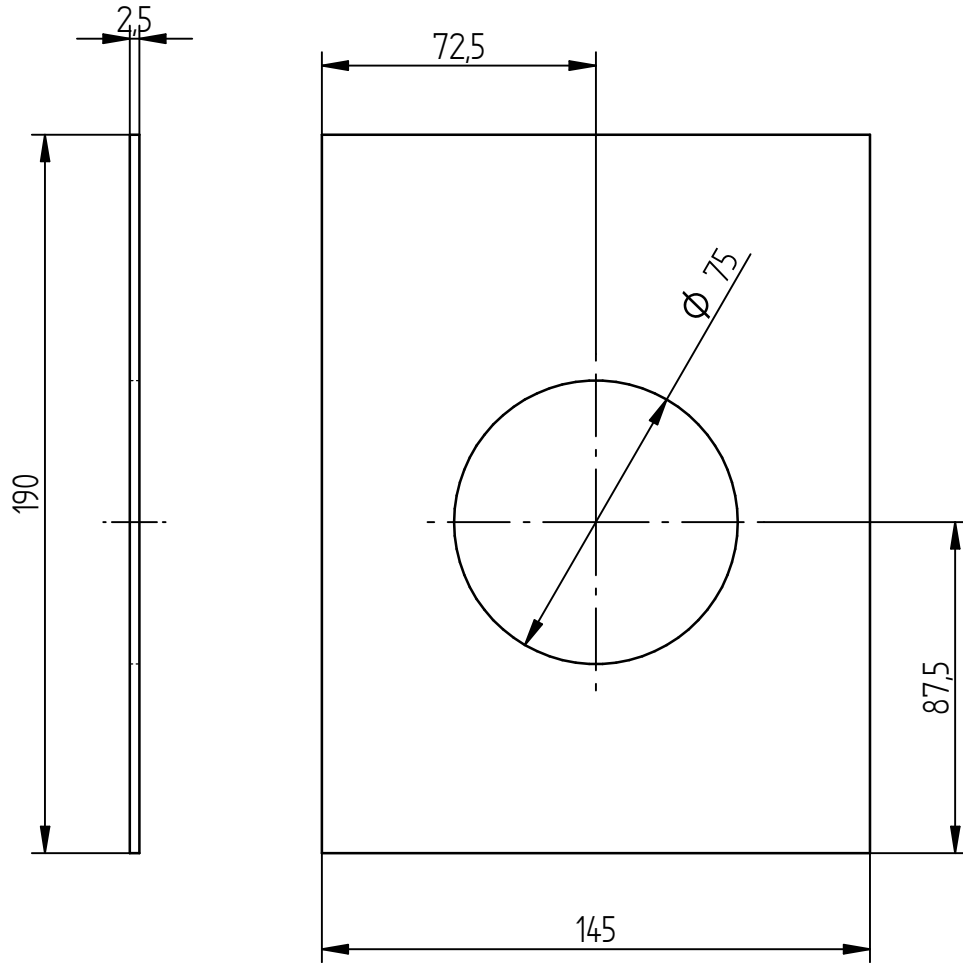
- [1] L. D. Feisel and A. J. Rosa, “The role of the laboratory in undergraduate engineering education,” *Journal of Engineering Education*, vol. 94, pp. 121–130, Enero 2005.
- [2] M. Domínguez, P. Reguera, and J. Fuertes, “Laboratorio remoto para la enseñanza de la automática en la Universidad de Leon (España),” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 2, no. 2, pp. 36–45, Abril 2005.
- [3] A. A. García, M. Berenguel, J. Guzmán, S. Dormido, and M. Domínguez, “Laboratorio remoto para el proceso de los cuatro tanques y su aplicación en docencia de control multivariable,” in *Actas de la IV Jornadas de Enseñanza a través de Internet/Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática*, 2005.
- [4] N. Duro, H. Vargas, R. Dormido, S. Dormido, and J. Sánchez, “El sistema de tres tanques: un laboratorio virtual y remoto usando easy java simulations,” in *Actas de la IV Jornadas de Enseñanza a través de Internet/Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática*, 2005.
- [5] S. Dormido, H. Vargas, J. Sánchez, N. Duro, S. Dormido-Canto, and F. Morilla, “Developing and implementing virtual and remote labs for control education: The uned pilot experience,” in *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, 2008.
- [6] S. Dormido, J. Sánchez, and F. Morilla, “Laboratorios virtuales y remoto para la práctica a distancia de la automática,” in *XXI Jornadas de Automática*, 2000.
- [7] N. Aliane, J. Fernández, A. Martínez, and J. Ortíz, “Un laboratorio de ingeniería de control basado en internet,” *Información Tecnológica*, vol. 18, no. 6, pp. 19–26, 2007.
- [8] M. Stefanovic, V. Cvijetkovic, M. Matijevic, and V. Simic, “A labview-based

- remote laboratory experiments for control engineering education,” *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 19, pp. 538–549, Febrero 2009.
- [9] D. Márquez and O. Cárdenas, “Implementación de un laboratorio virtual para la enseñanza de controladores PID,” *Información Tecnológica*, vol. 19, no. 3, pp. 75–78, 2008.
 - [10] R. Vásquez and F. Castrillón, “Comparación de diferentes técnicas adicionales para el control de procesos,” in *Memorias del XII Congreso Latinoamericano de Control Automático CLCA*, 2006.
 - [11] F. Castrillón and J. Ocampo, “Sintonía de sistemas de control en cascada. comparación de diferentes métodos,” *Ingeniería Química*, vol. 473, pp. 6–70, 2009.
 - [12] S. Agudelo, E. Ortiz, R. Vásquez, and F. Castrillón, “Comparación de técnicas adicionales de control,” *Ingeniería Química*, vol. 484, pp. 62–69, 2010.
 - [13] R. Vásquez and F. Castrillón, “Decrease of the energetic consumption in process control,” in *ASME Conference Proceedings*, 2010.
 - [14] D. Castellanos and F. Castrillón, “Controladores PI/PID en procesos con respuesta inversa, evaluación de la robustez,” *Ingeniería Química*, vol. 502, pp. 48–52, 2012.
 - [15] R. Vásquez and J. Vásquez, “Implementación de un control digital en un PC para un proceso de flujo,” in *Memorias del VI Congreso nacional de la Asociación Colombiana de Automática*, Ibagué, Colombia, 2004.
 - [16] F. Castrillón and R. Vásquez, “Estrategias para compensar no linealidades generadas por válvulas en lazos de control del flujo,” *CIT Información Tecnológica*, vol. 18, pp. 161–168, 2007.
 - [17] R. Vásquez, J. Correa, S. Tamayo, and J. Vásquez, “Development of a laboratory equipment for the analysis of mechanisms,” in *Proceedings of the ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 7, no. IMECE2007–41994, Seattle, WA, 2007, pp. 179–185.
 - [18] M. Betancur, J. Carvajal, L. Congote, D. Díaz, and E. Rincón, “Desarrollo de un

- equipo didáctico para prácticas de control de tensión en un cabezote textil,” in *Memorias de XVIII INGENIAR*, 2008.
- [19] P. Horacek, “Laboratory experiments for control theory courses: a survey,” *Annual Reviews in Control*, vol. 24, pp. 151–162, 2000.
 - [20] F. Morilla, A. Isabel, and J. Sánchez, “Entorno de experimentación sobre control de nivel y control de caudal,” in *Memorias de las XXIII Jornadas de Automática, Comité Español de Automática*, 2002.
 - [21] A. Gómez and J. Orózco, “Diseño integrado de un sistema de tanques en cascada,” Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, 2006.
 - [22] E. Crawley, J. Malmqvist, S. Ostlund, and D. Brodeur, *Rethinking Engineering Education*. Springer, 2007.
 - [23] J. Spurlin, S. Rajala, and J. Lavelle, *Designing Better Engineering Education Through Assessment*. Stylus Publishing, 2008.
 - [24] J. de Azevedo–Netto, M. Fernandez y Fernandez, R. de Araujo, and A. Eiji–Ito, *Manual de hidráulica*, 8th ed. Editora Edgard Blucher, 1998.

ANEXOS

A. PLANOS DETALLADOS PARA FABRICACIÓN Y ENSAMBLE



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

VERTEDERO CIRCULAR

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

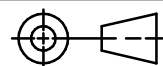
DIBUJO: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:2

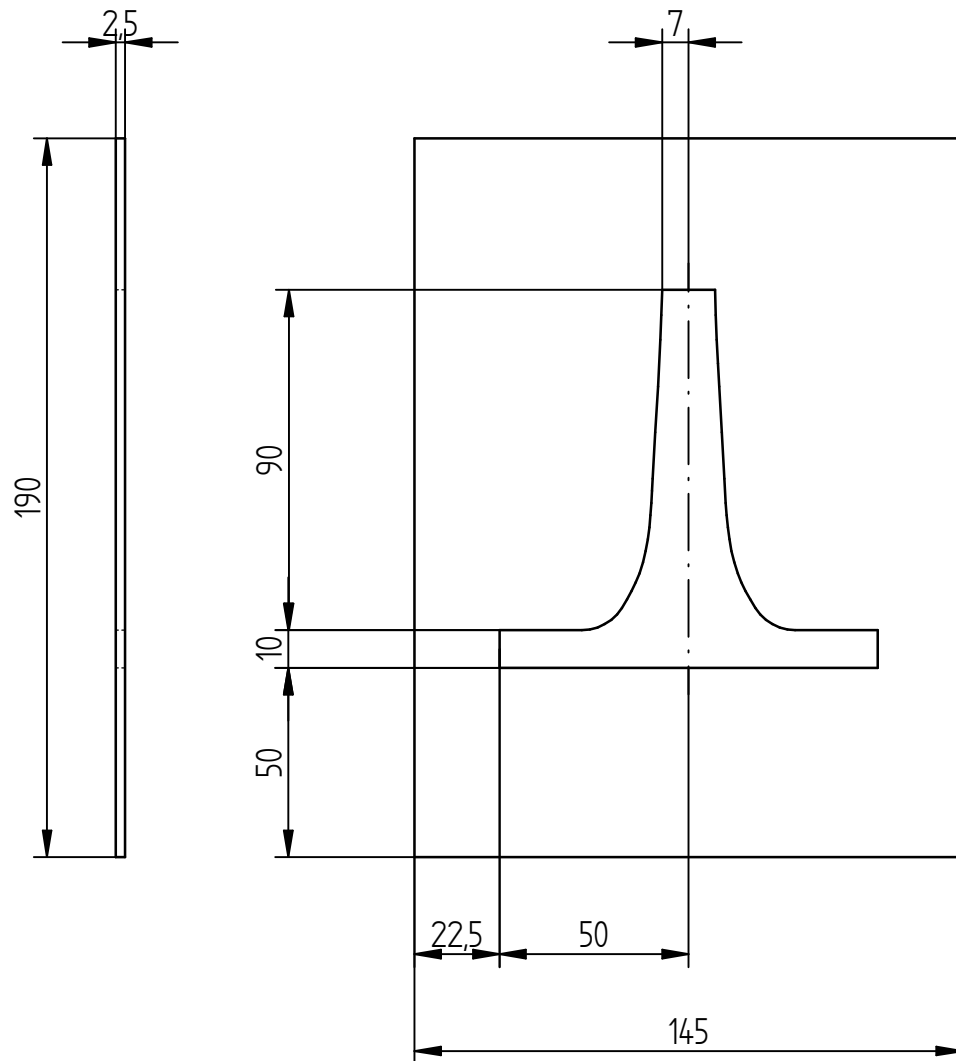
PLANO: 1

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACRÍLICO



SOLID EDGE SOFTWARE



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

VERTEDERO PROPORCIONAL

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

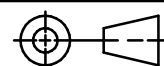
DIBUJO: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:2

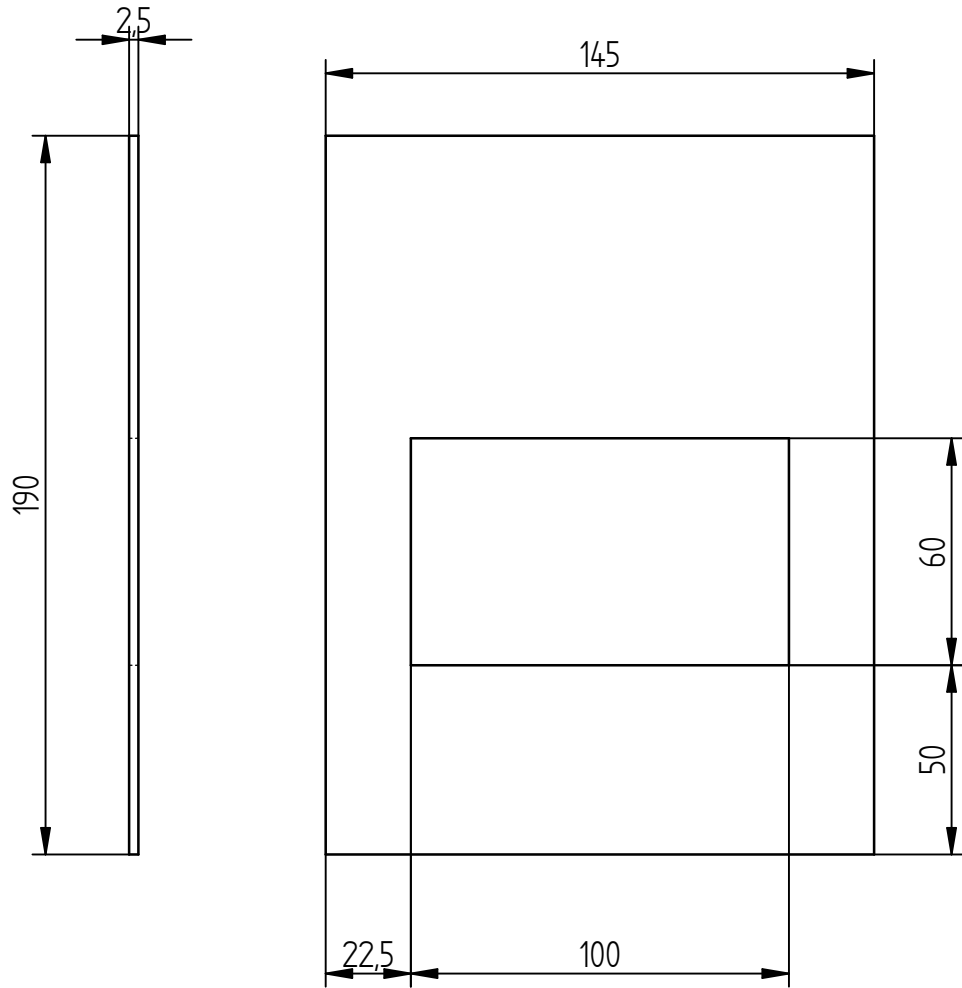
PLANO: 2

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACRÍLICO



SOLID EDGE 2015



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

VERTEDERO RECTANGULAR

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

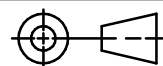
DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:2

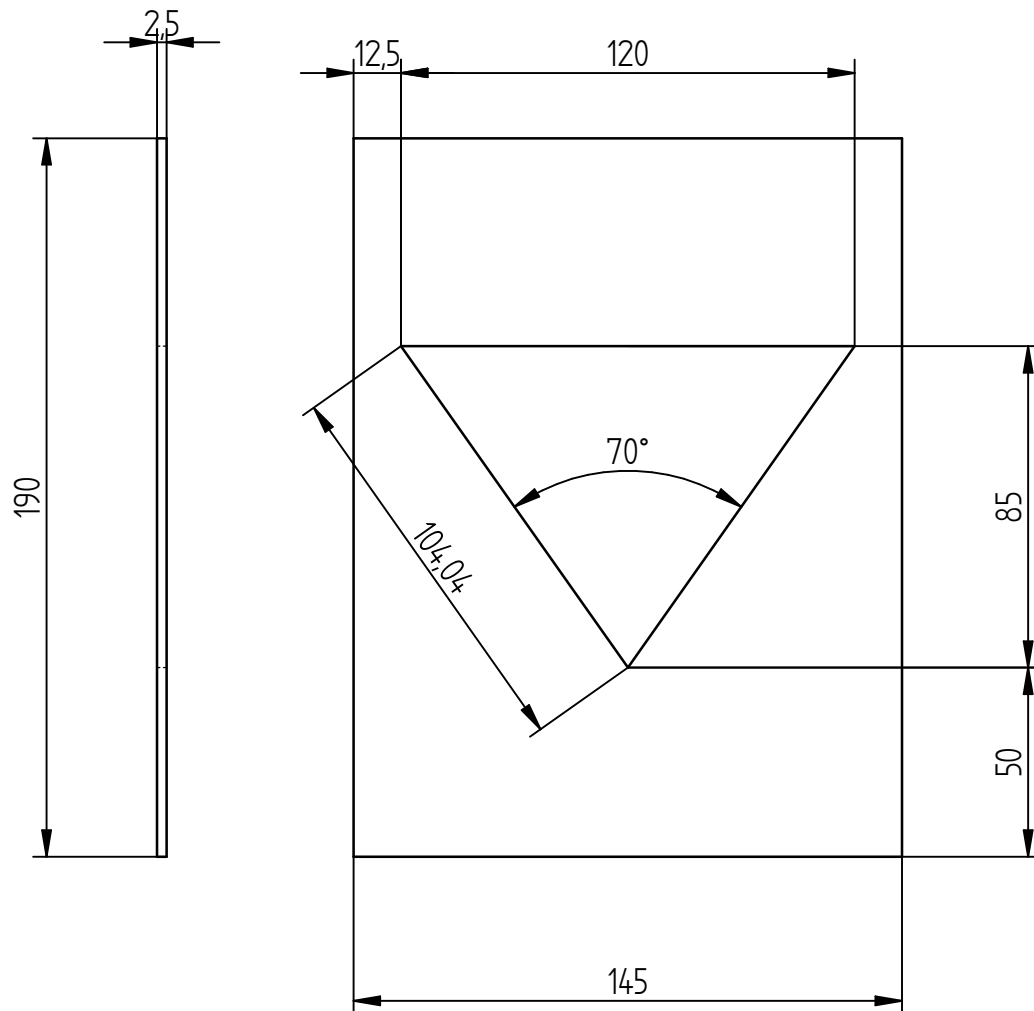
PLANO: 3

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACRÍLICO



SOLID EDGE 2D/3D CAD



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

VERTEDERO TRIANGULAR

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

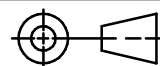
DIBUJO: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:2

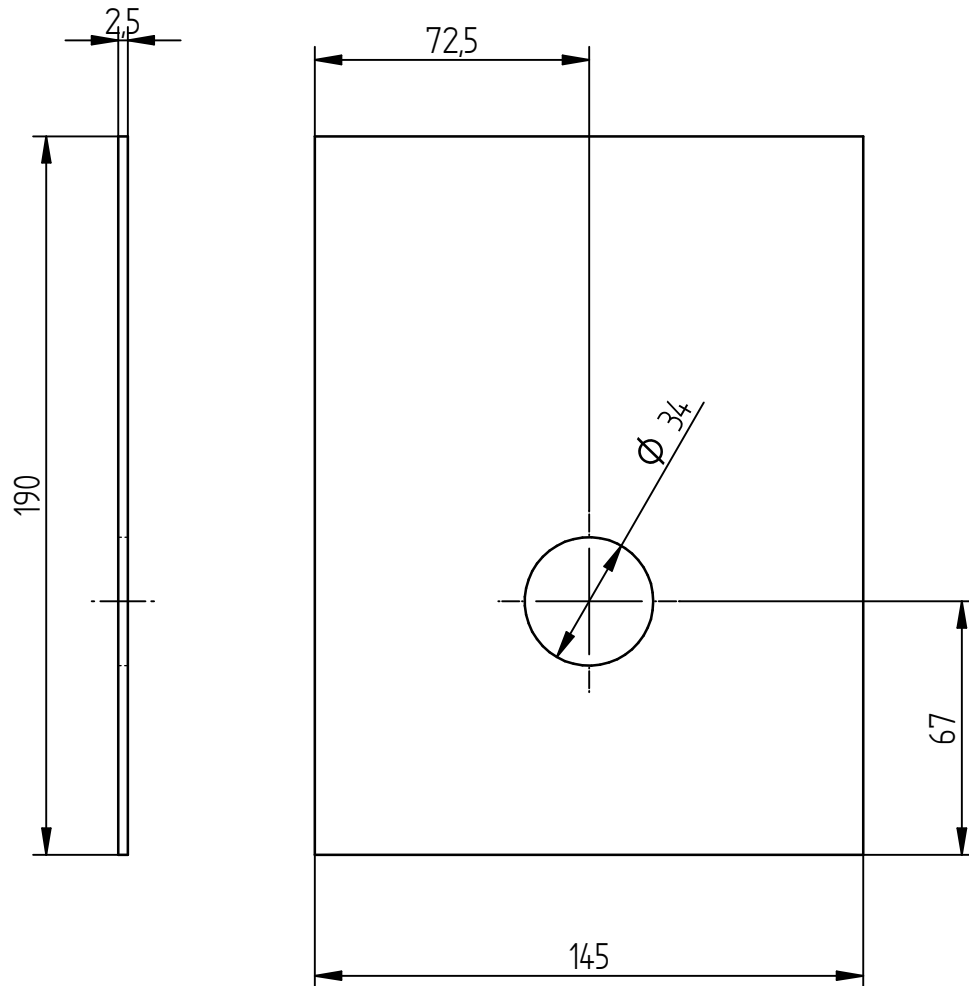
PLANO: 4

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACRÍLICO



SOLID EDGE 2D/3D CAD



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

VERTEDERO PARA TIEMPO MUERTO

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

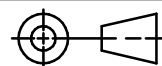
DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:2

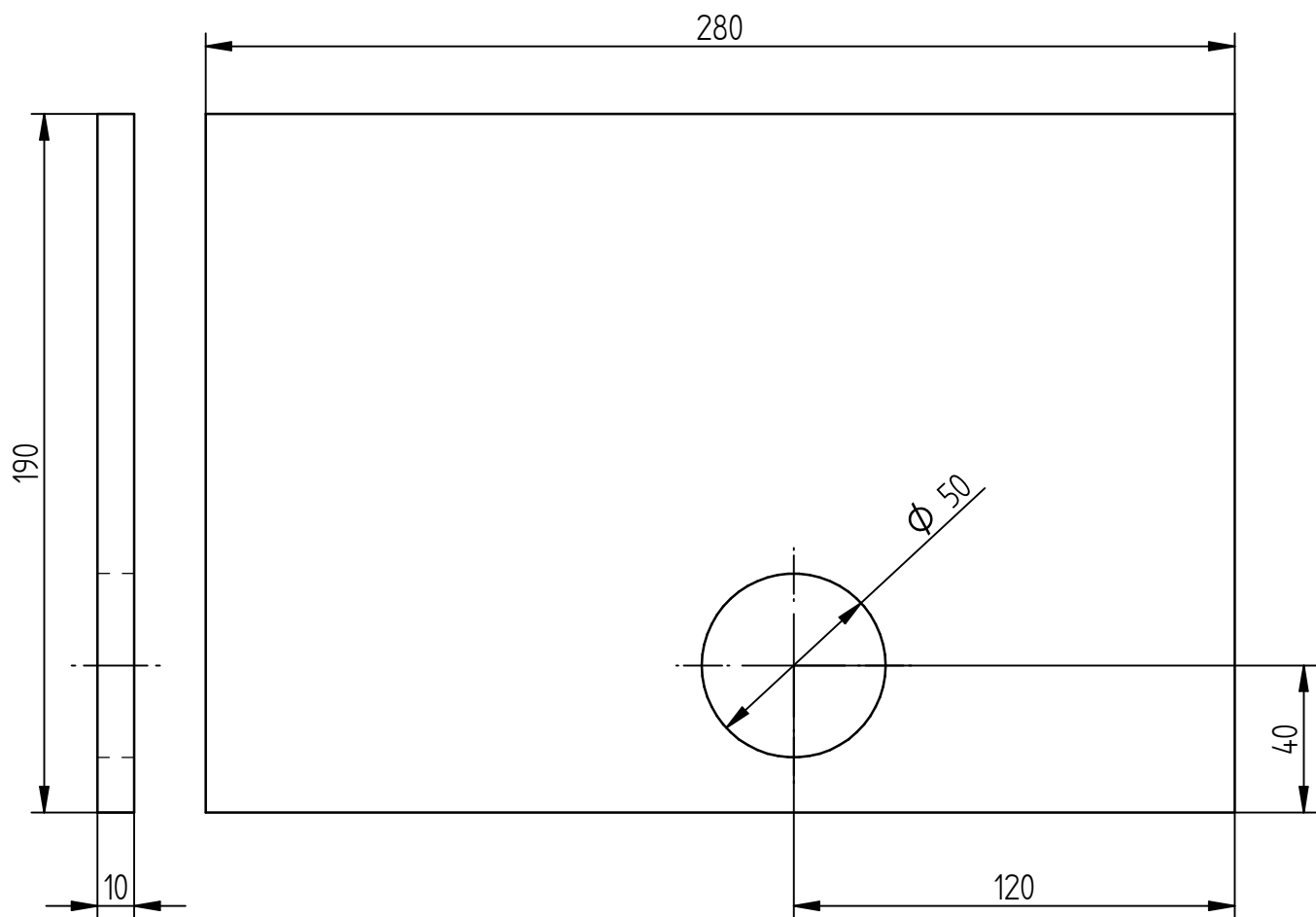
PLANO: 5

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACRÍLICO



SOLID EDGE 2021



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

DIVISOR TANQUE UNO

DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:2

MATERIAL: ACRÍLICO

PLANO: 6

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$



SOLID EDGE 2D MECHANICAL DESIGN



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

ATENUADOR TANQUE DOS

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

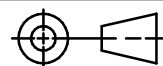
DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:2

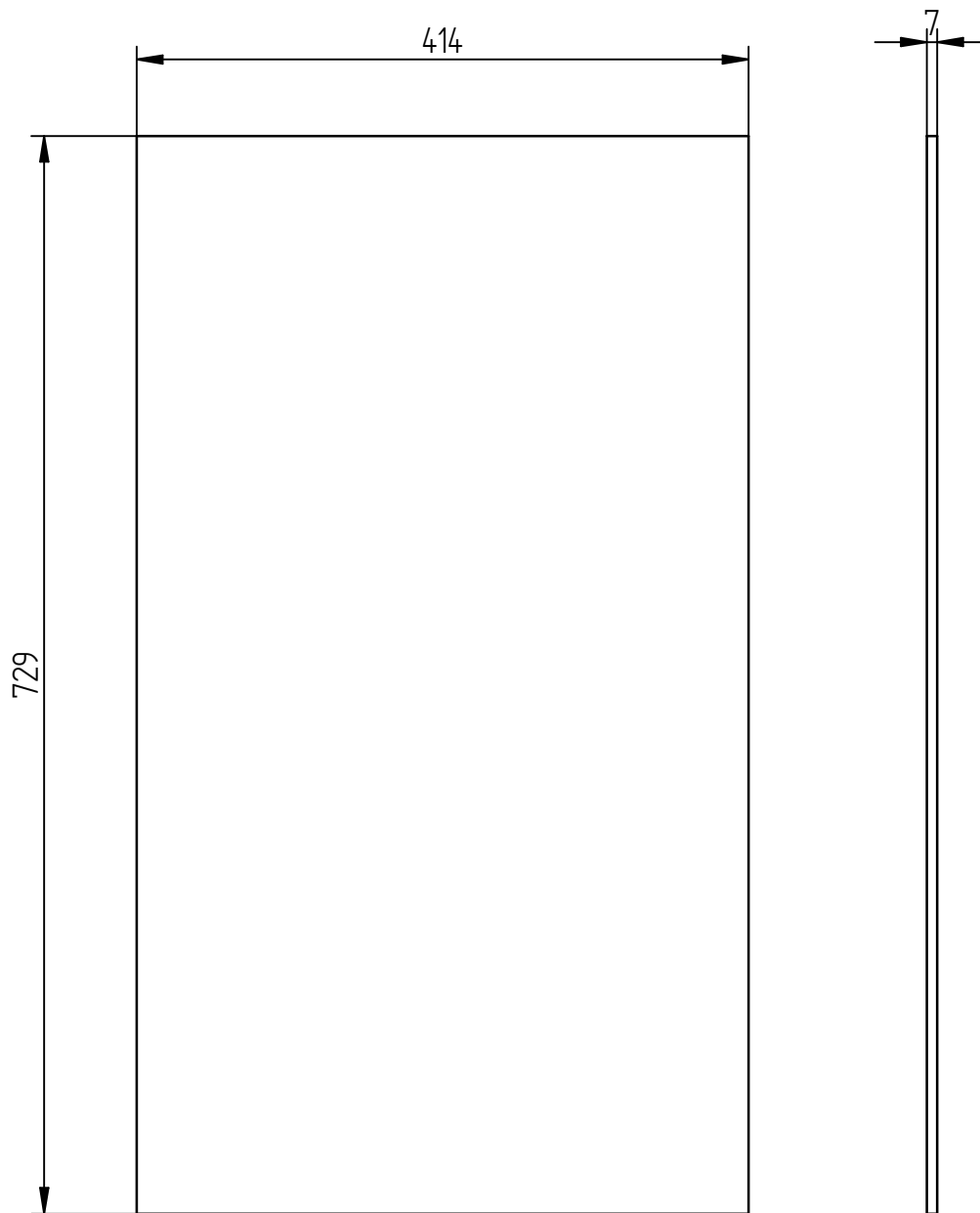
PLANO: 7

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACRÍLICO



SOLID EDGE 2021



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

LÁMINA POSTERIOR DEL GABINETE

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:5

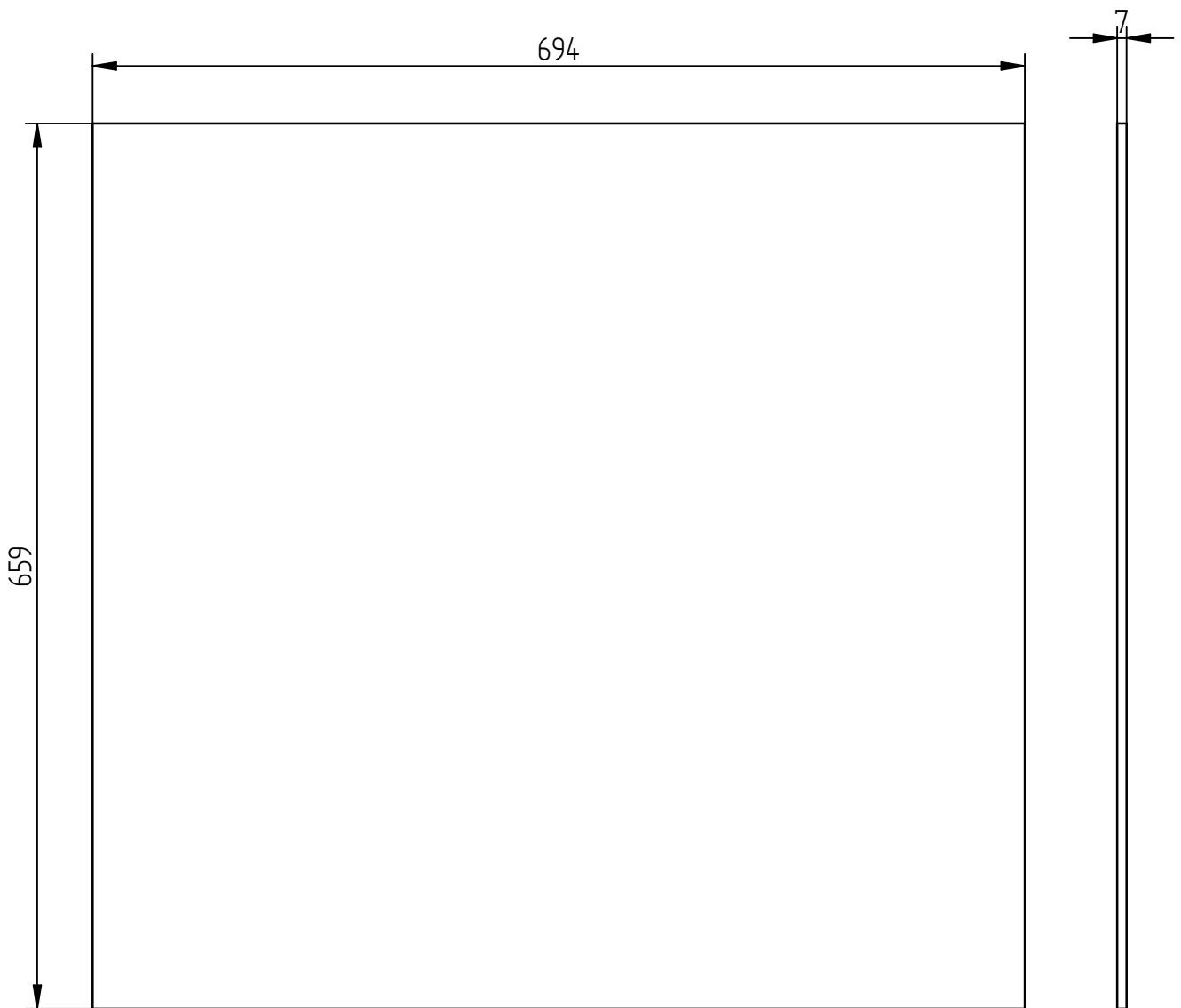
PLANO: 8

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACRÍLICO



SOLID EDGE 2021



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

LÁMINA PUERTA GABINETE

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

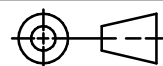
DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:5

PLANO: 9

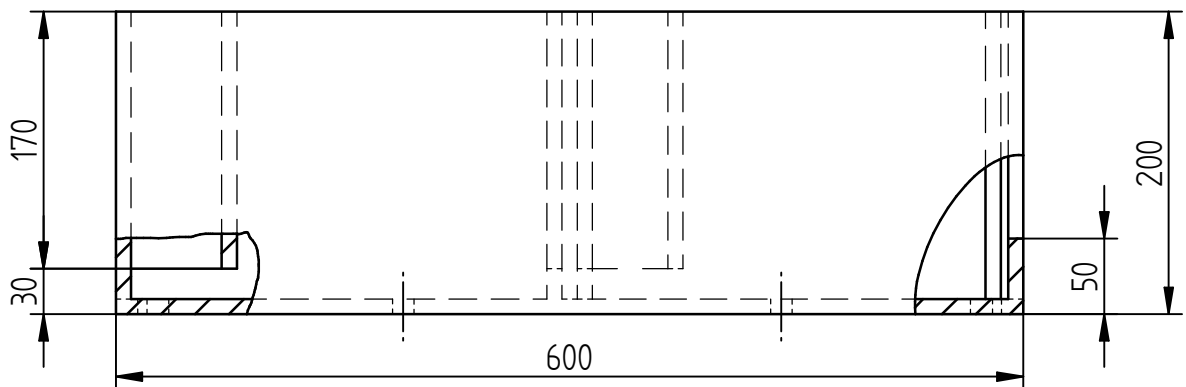
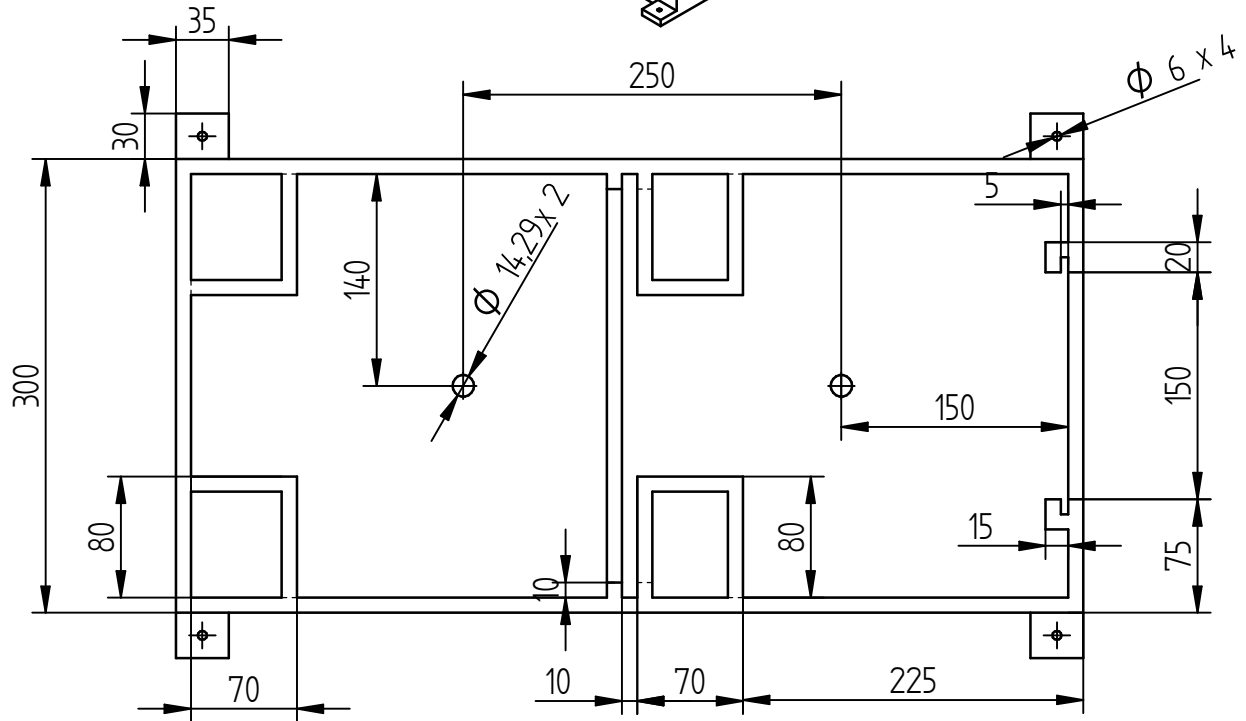
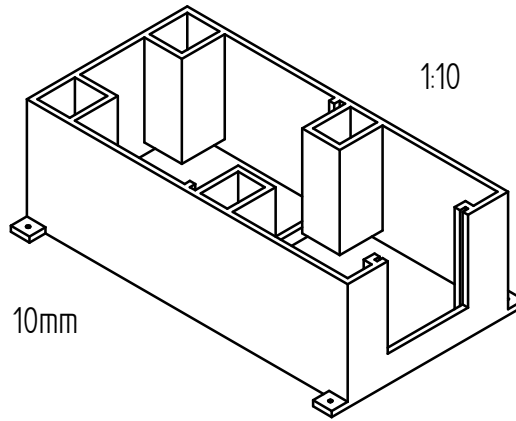
TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACRÍLICO



SOLID EDGE 2021

NOTA: ESPESOR DE LÁMINA DE 10mm



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

TANQUE UNO

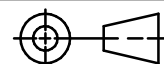
DIBUJO: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:5

PLANO: 10

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

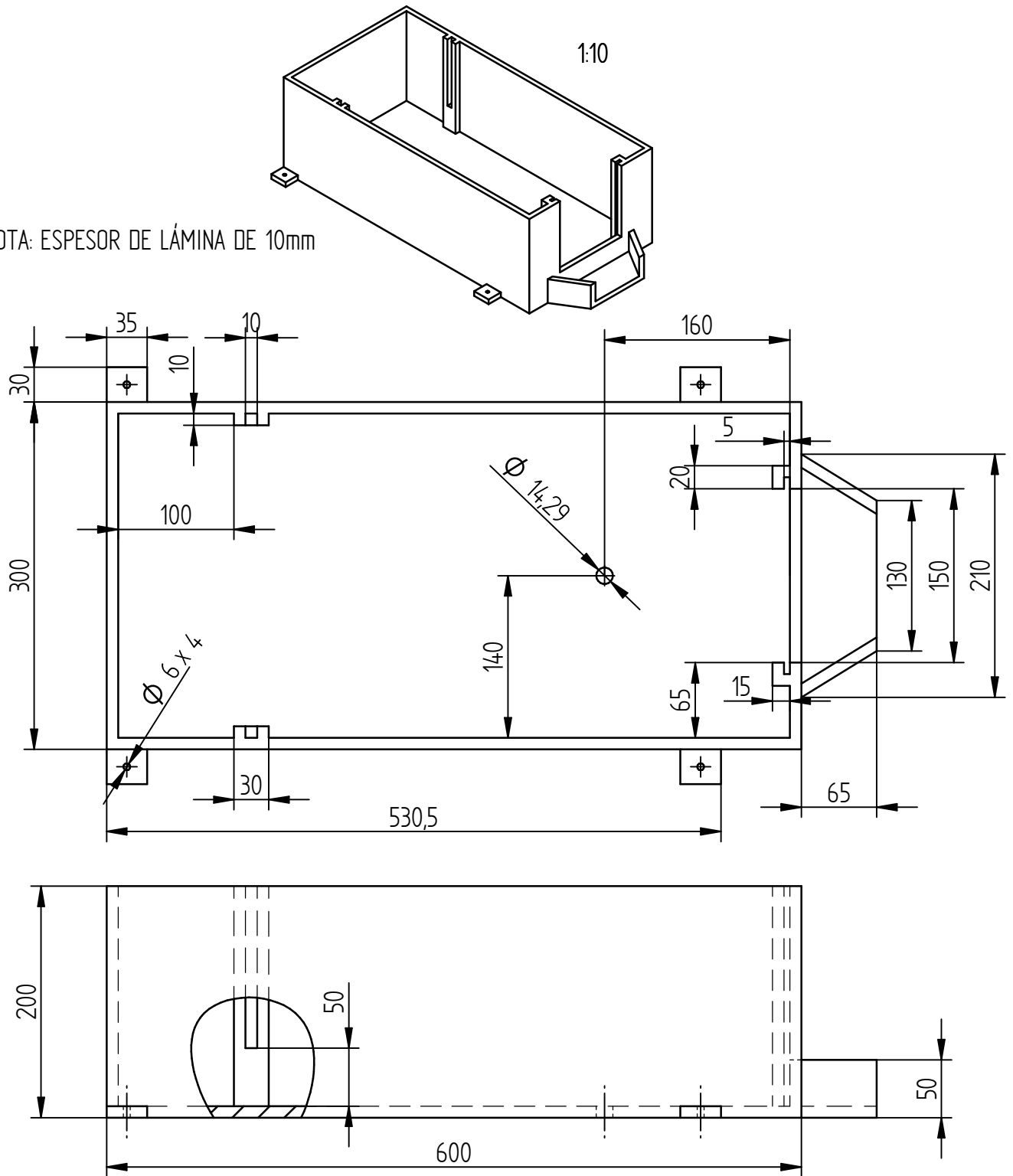
MATERIAL: ACRÍLICO



Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

SOLID EDGE 2021

NOTA: ESPESOR DE LÁMINA DE 10mm



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

TANQUE DOS

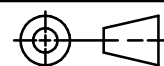
DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:5

PLANO: 11

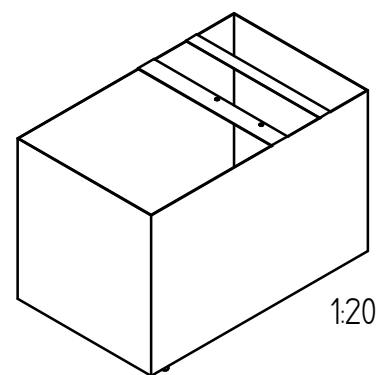
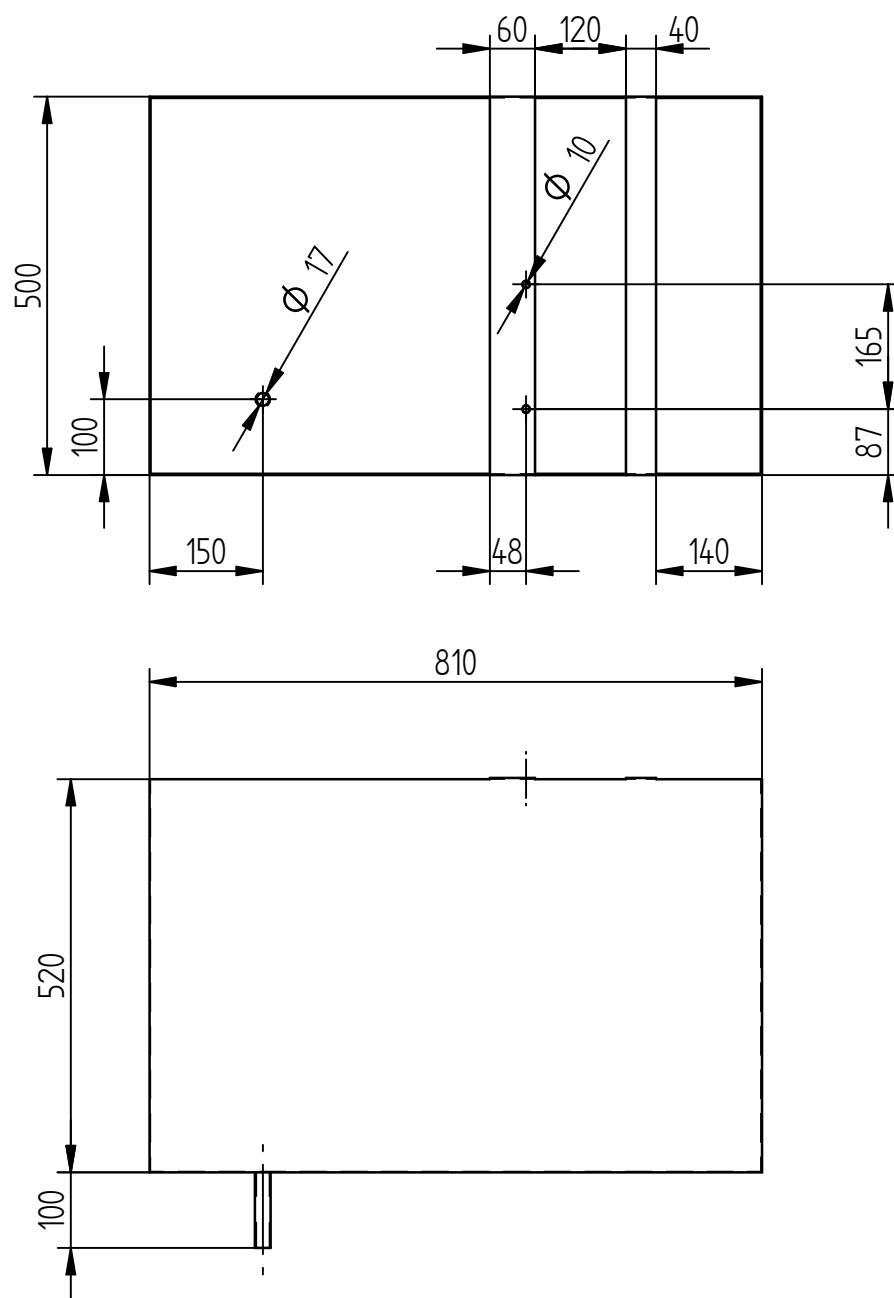
TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACRÍLICO



SOLID EDGE 2021

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

TANQUE DE ACUMULACIÓN

DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:10

MATERIAL: ACERO CALIBRE 18

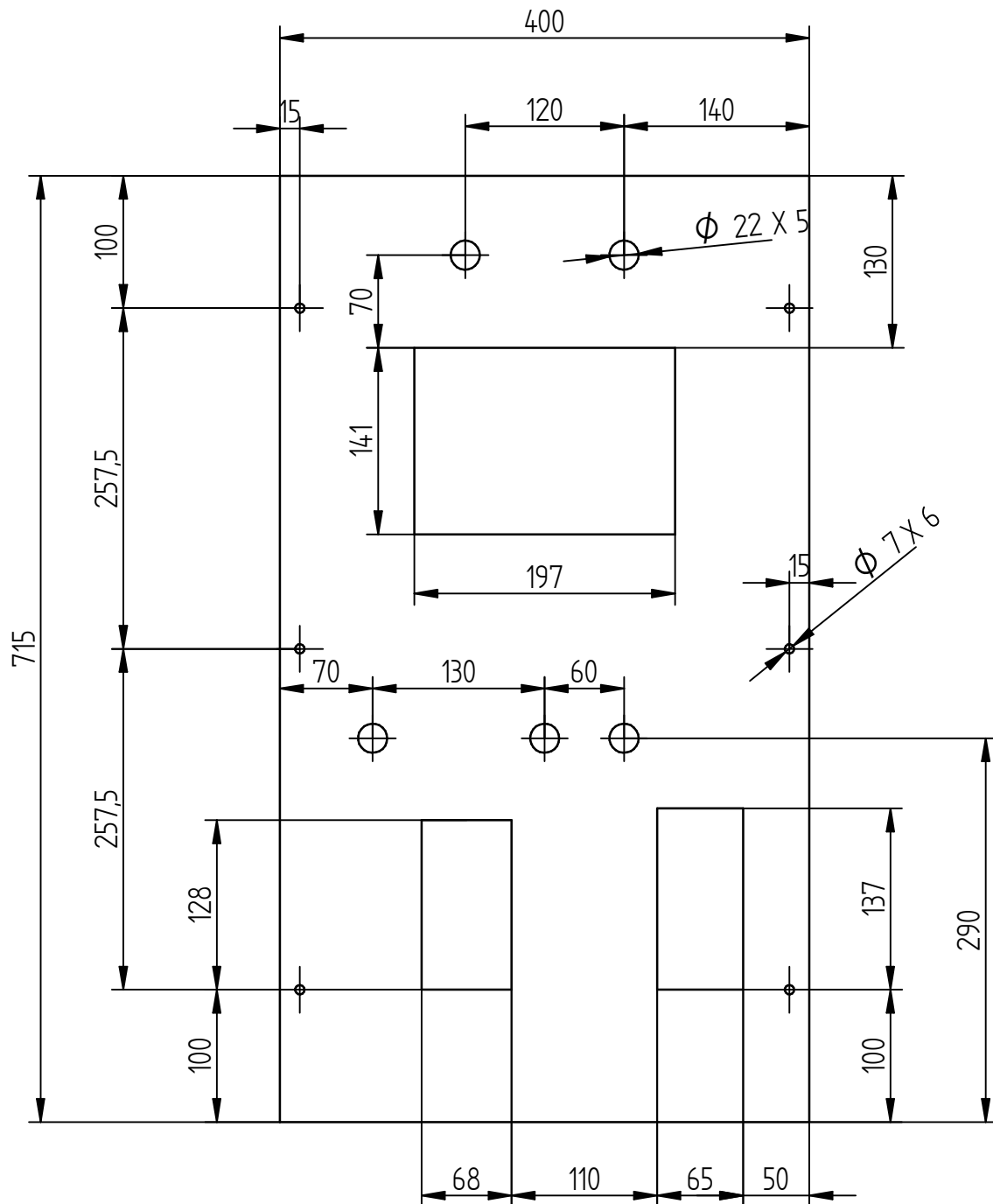
PLANO: 12

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$



SOLID EDGE 2015



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

LÁMINA FRONTAL DEL GABINETE

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

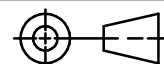
DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:5

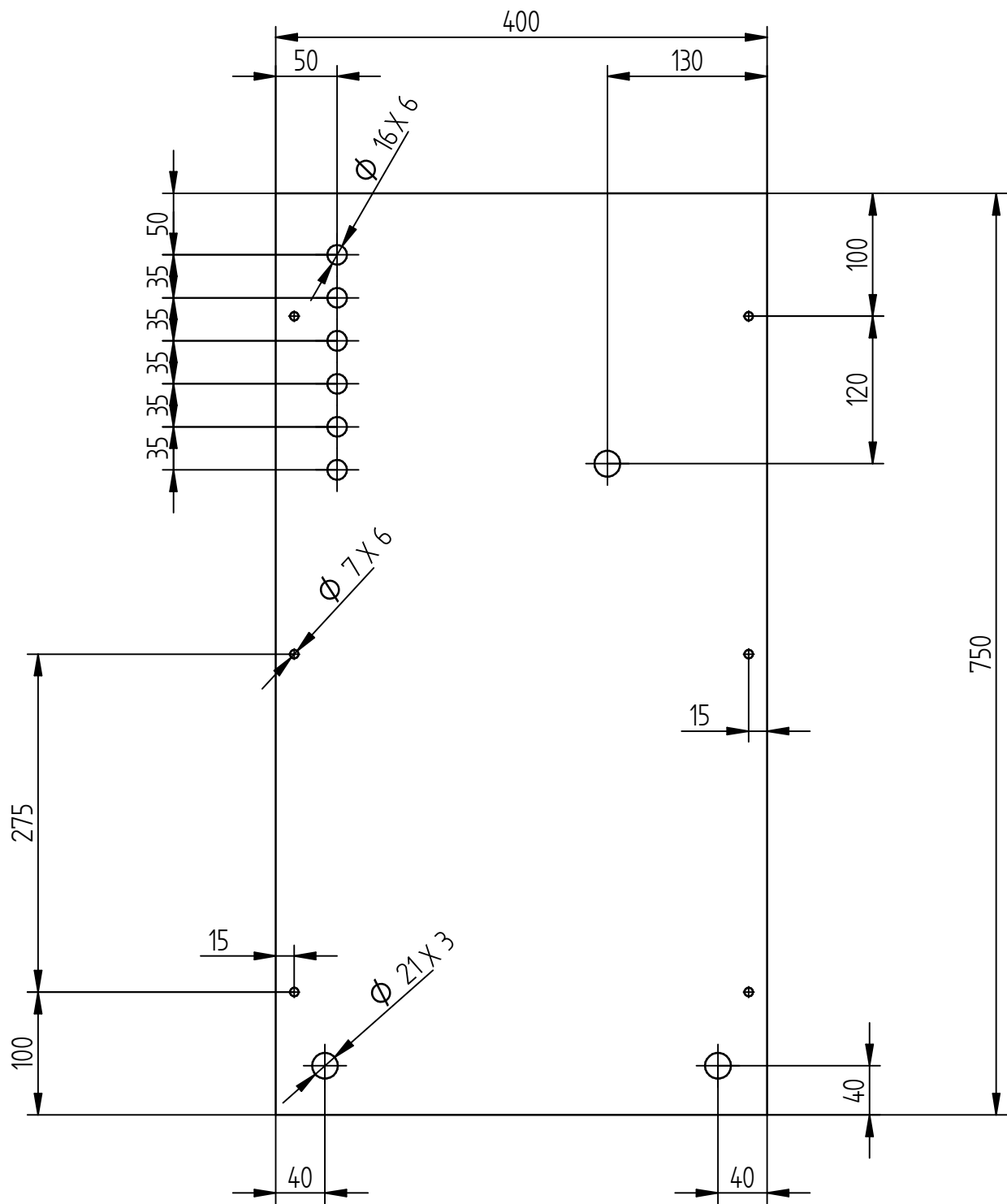
PLANO: 13

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACERO CALIBRE 18



SOLID EDGE 2015



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

LÁMINA BASE DEL GABINETE

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

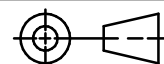
DIBUJO: DAVID GIRALDO

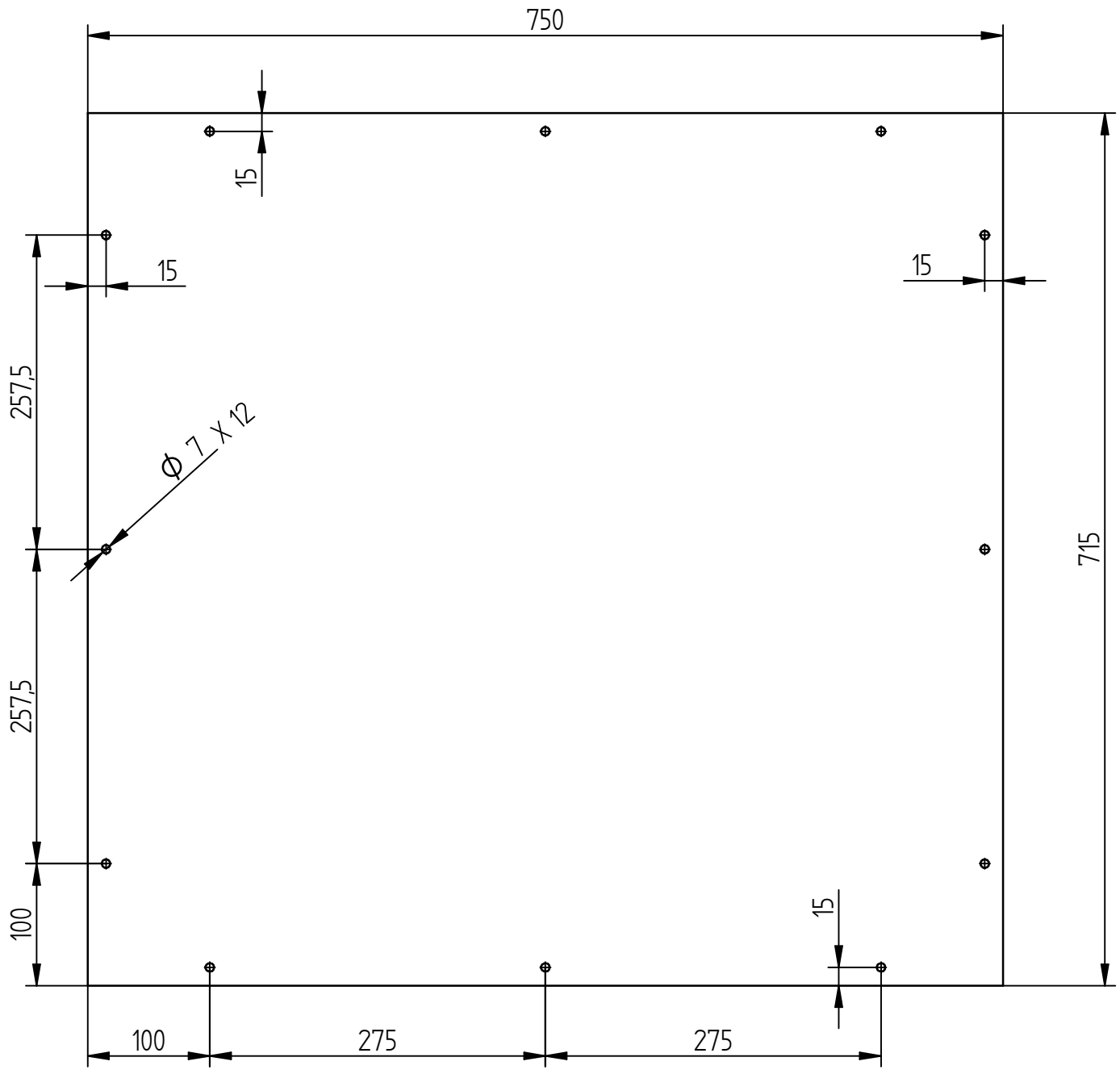
ESCALA: 1:5

PLANO: 14

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACERO CALIBRE 18





DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

LÁMINA SOPORTE DE ELEMENTOS DEL GABINETE

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

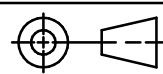
DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:5

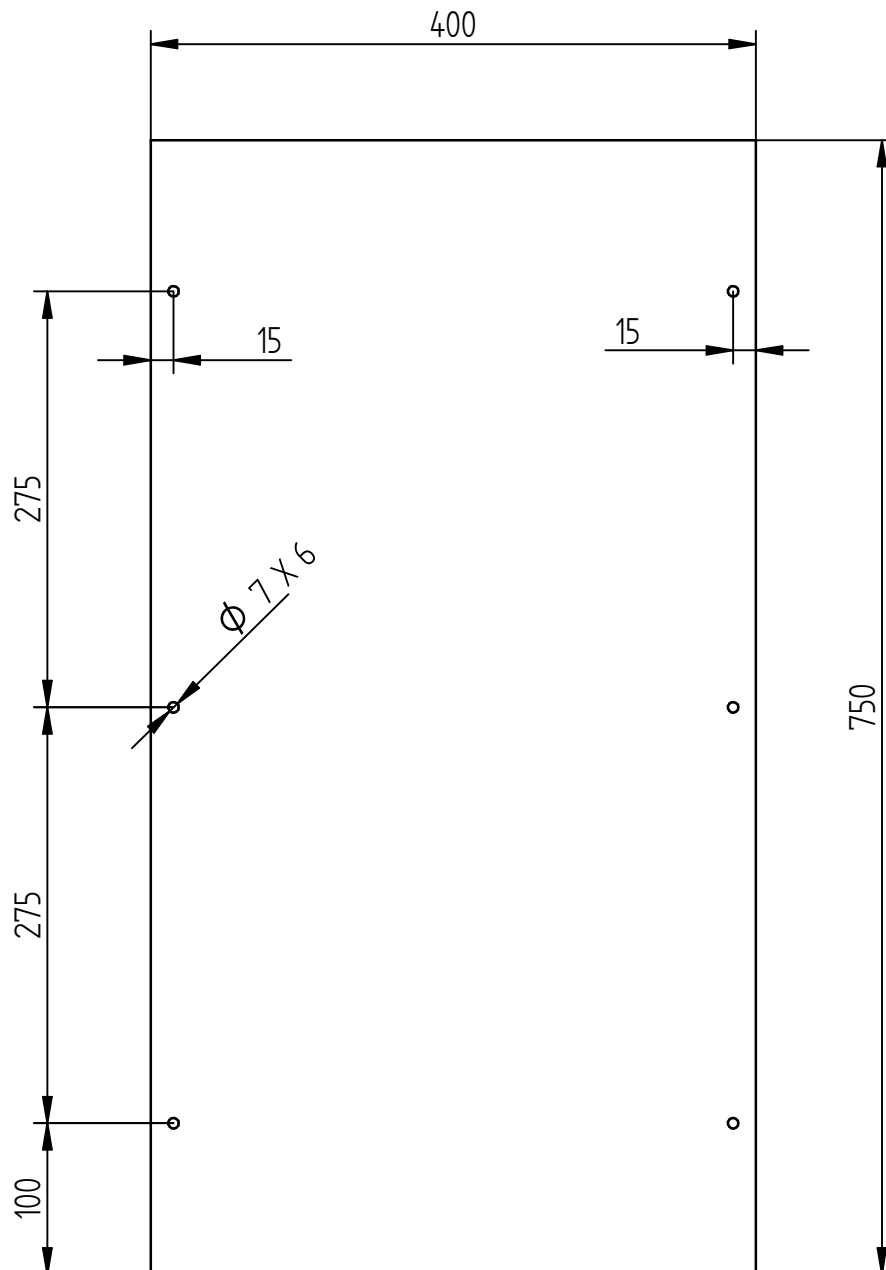
MATERIAL: ACERO CALIBRE 18

PLANO: 15

TAMAÑO DE HOJA: CARTA



SOLID EDGE 2D MECHANICAL DESIGN



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

LÁMINA SUPERIOR DEL GABINETE

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

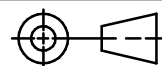
DIBUJO: DAVID GIRALDO

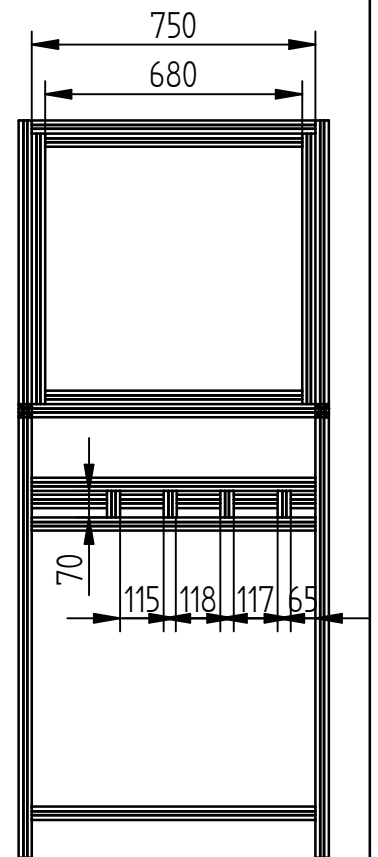
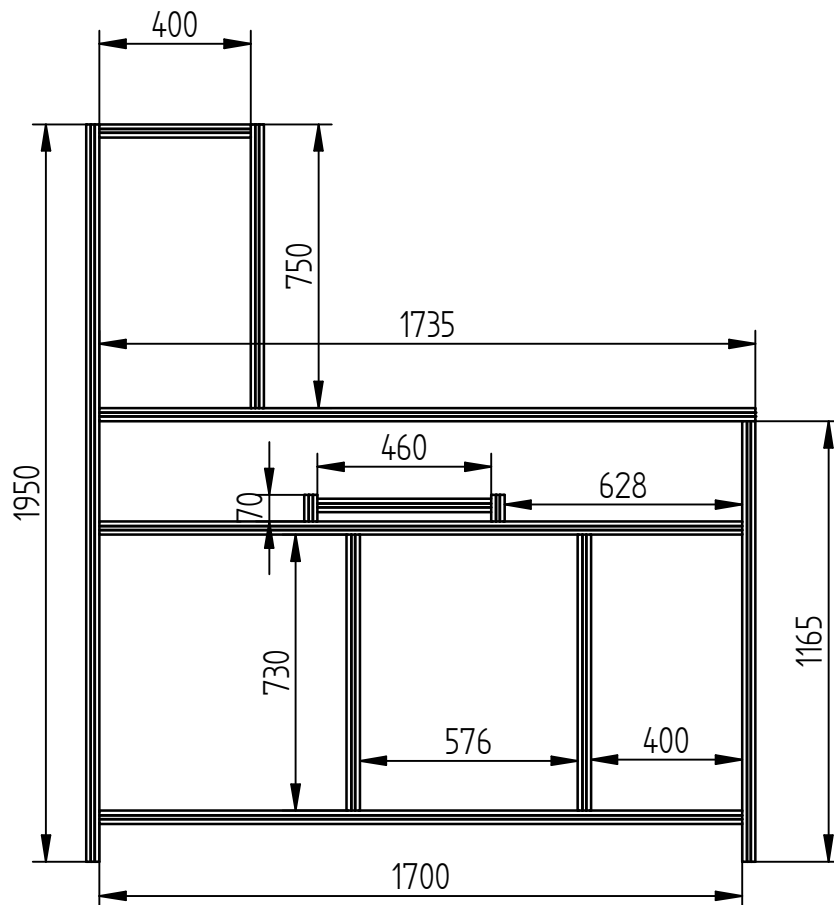
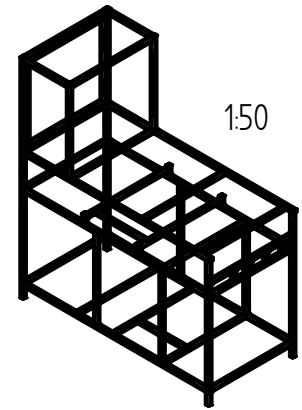
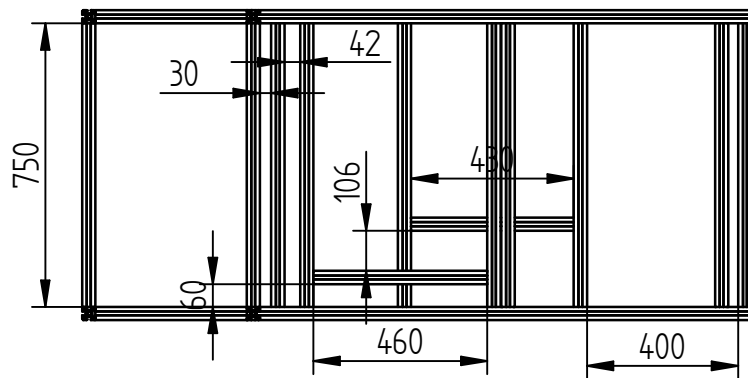
ESCALA: 1:5

PLANO: 16

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL: ACERO CALIBRE 18





Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

ESTRUCTURA

DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

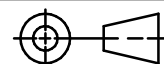
ESCALA: 1:20

PLANO: 17

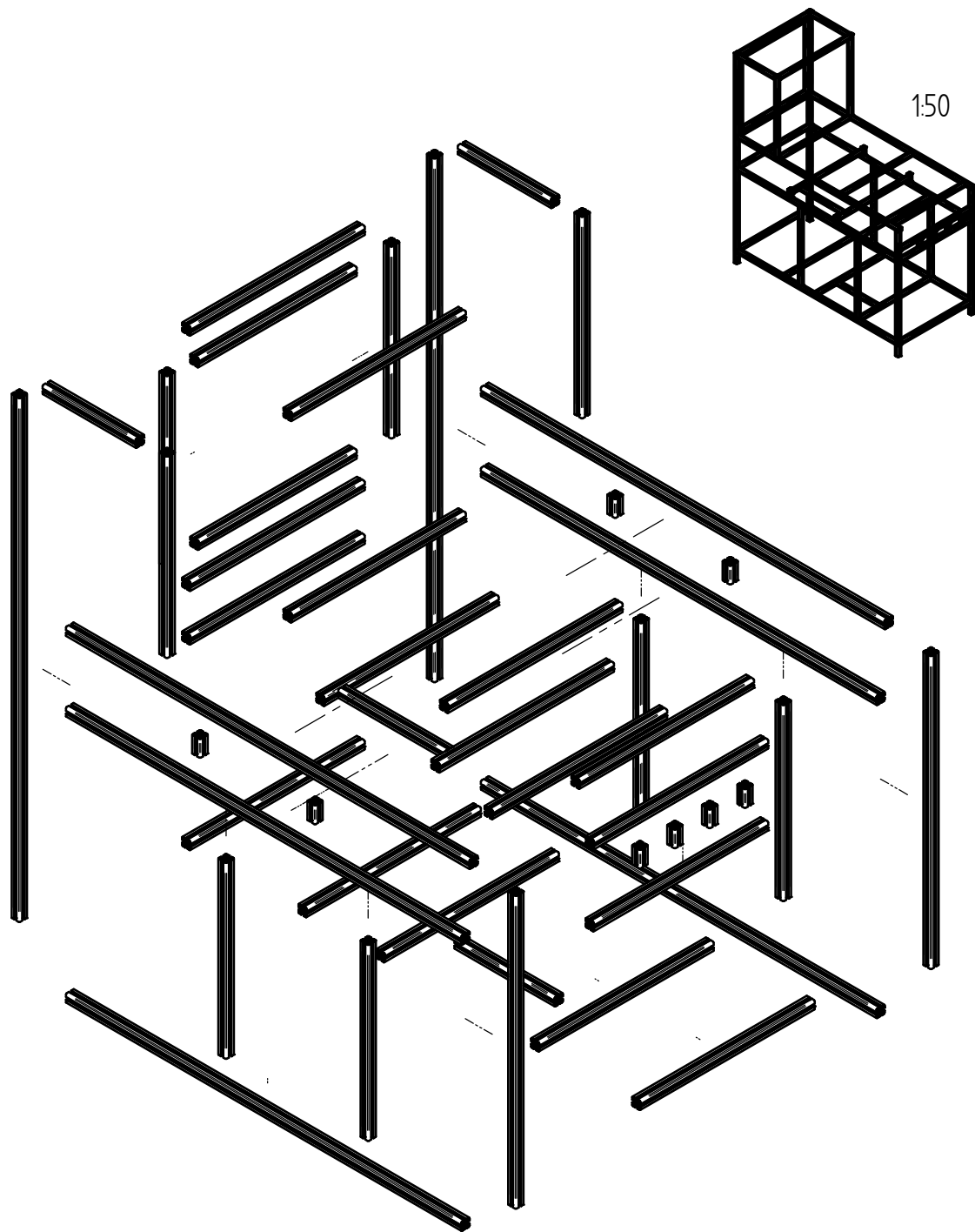
TAMAÑO DE HOJA: CARTA

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

MATERIAL: PERFIL ALUMINIO 35mm



SOLID EDGE 2017



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

EXPLOSIONADO DE LA ESTRUCTURA

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

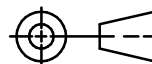
DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:20

PLANO: 18

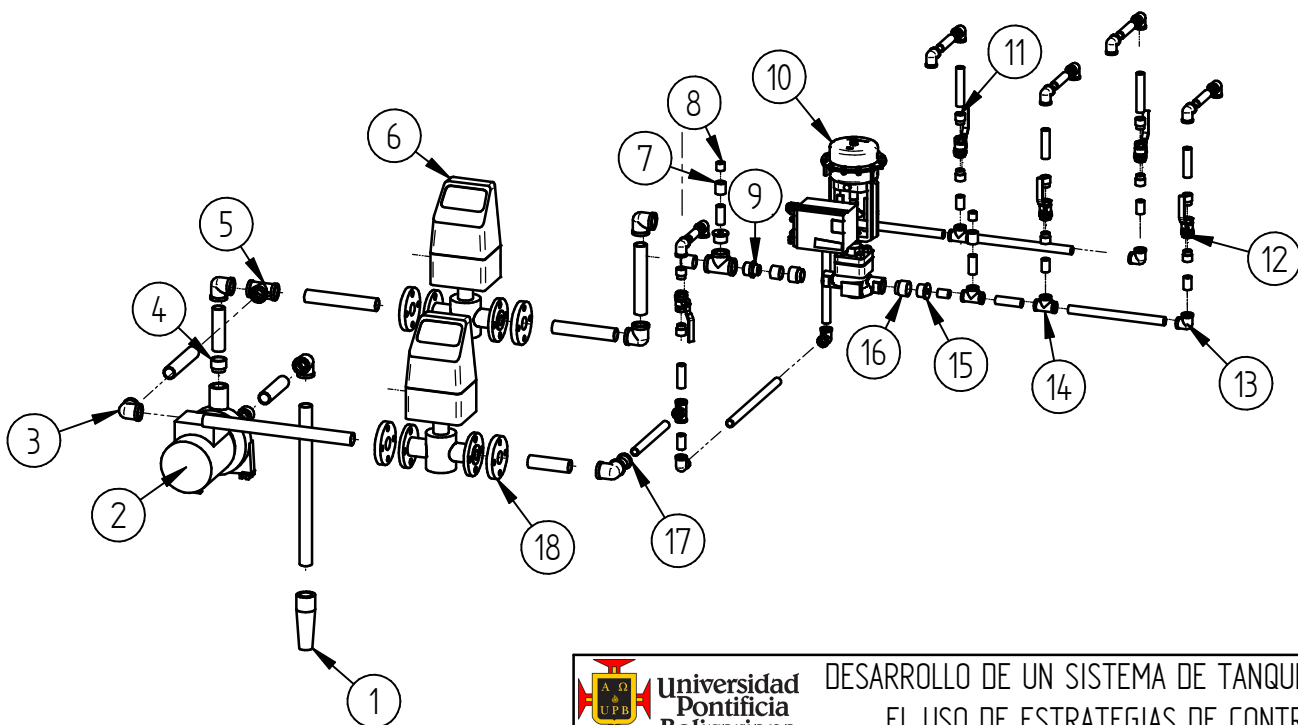
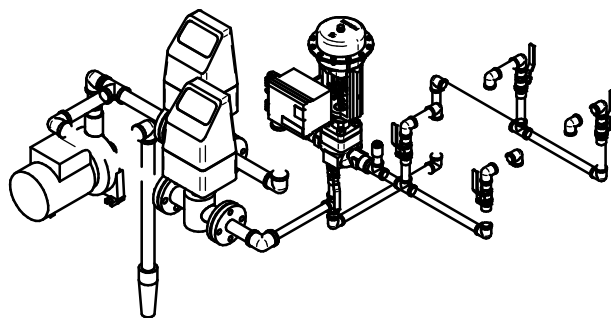
TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL:



SOLID EDGE 2011

ITEM	NOMBRE	CANTIDAD	ITEM	NOMBRE	CANTIDAD
1	VÁLVULA CHEQUE	1	10	VÁLVULA DE CONTROL	1
2	BOMBA	1	11	ACOPLE LISO A ROSCA 1/2"	10
3	CODO 1"	5	12	VÁLVULA DE BOLA 1/2"	5
4	ACOPLE LISO A ROSCA 1"	5	13	CODO 1/2"	15
5	TEE 1"	2	14	TEE 1/2"	4
6	TRANSMISOR DE FLUJO	2	15	ACOPLE 3/4" A 1/2"	1
7	ACOPLE HEMBRA 1/2"	2	16	ACOPLE LISO A ROSCA 3/4"	2
8	TAPÓN 1/2"	2	17	ACOPLE 1" A 1/2"	1
9	ACOPLE 1" A 3/4"	1	18	BRIDA	4



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

EXPLOSIONADO RED DE TUBERÍA

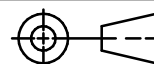
DIBUJO: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:20

PLANO: 19

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

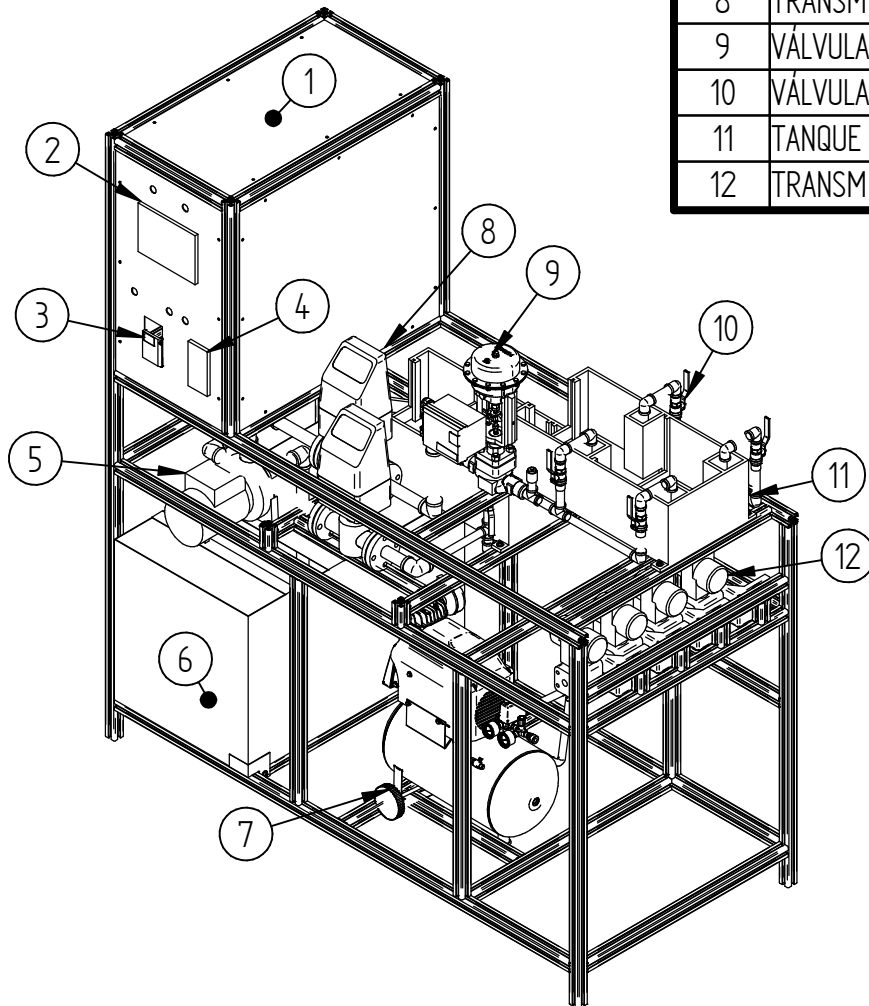
MATERIAL:



Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

SOLID EDGE

ITEM	NOMBRE	CANTIDAD
1	GABINETE DE CONTROL	1
2	PANTALLA	1
3	VARIADOR DE VELOCIDAD	1
4	CONTROLADOR	1
5	BOMBA	1
6	TANQUE DE ALMACENAMIENTO	1
7	COMPRESOR	1
8	TRANSMISOR DE FLUJO	2
9	VÁLVULA DE CONTROL	1
10	VÁLVULA DE BOLA	5
11	TANQUE	2
12	TRANSMISOR DE PRESIÓN	4



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

ENSAMBLE

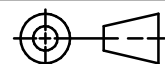
DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA: 1:20

PLANO: 20

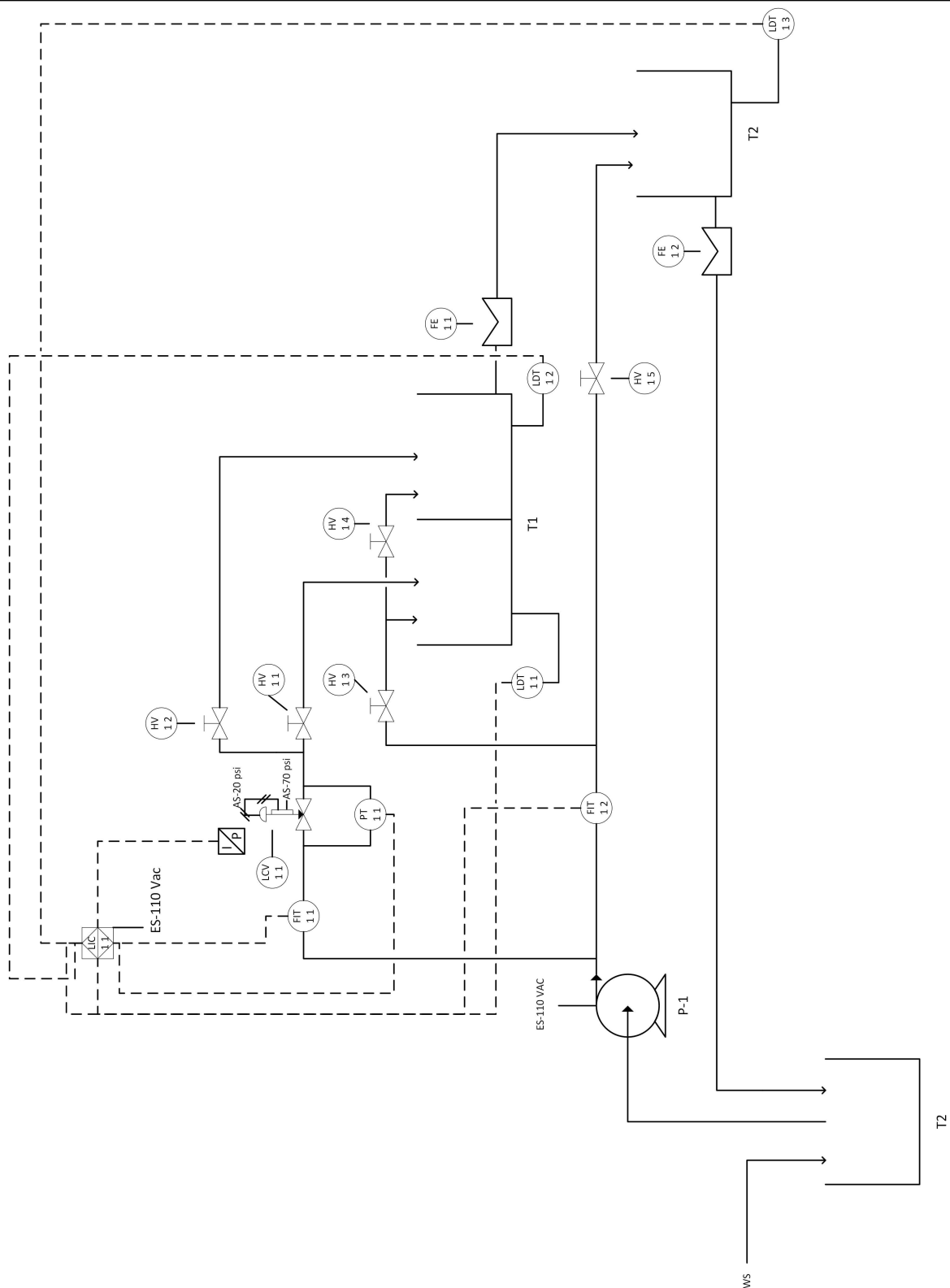
TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL:



Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

SOLID EDGE



Universidad
Pontificia
Bolivariana

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA
EL USO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

INGENIERÍA MECÁNICA

DIAGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN Y PROCESOS P&ID

Salvo indicación contraria
cotas en milímetros
ángulos en grados
tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$

DIBUJÓ: DAVID GIRALDO

ESCALA:

PLANO: 21

TAMAÑO DE HOJA: CARTA

MATERIAL:



B. ARTÍCULO PUBLICADO EN INGENIAR 2013

Desarrollo de un Sistema de Tanques para el Estudio de Estrategias de Control

David GIRALDO, Rafael E. VÁSQUEZ

*Universidad Pontificia Bolivariana, Grupo de Automática y Diseño A+D;
Cir. 1 # 70-01, Medellín, Colombia.
david.giraldodu@alfa.upb.edu.co*

Resumen: Este artículo muestra la primera etapa del desarrollo de un sistema de tanques didáctico que será usado para el estudio de estrategias de control clásicas y avanzadas. El proceso de diseño se realizó en tres pasos: diseño conceptual, diseño básico y diseño de detalle. Se obtuvo un prototipo virtual que permite verificar los requerimientos del diseño antes de la manufactura. El equipo será usado a nivel de laboratorio por estudiantes, docentes e investigadores dentro de la Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín. *Copyright © 2013 UPB*

Palabras clave: Sistema de tanques, Laboratorio de control, Diseño de equipos de laboratorio.

Abstract: This paper addresses the first stage of the development of a didactic tank system that will be used to study basic and advanced control strategies. The design process was divided into three steps: conceptual design, basic design, and detailed design. A virtual prototype that allows to verify design requirements before manufacturing was obtained. The equipment will be used in laboratories by students, instructors, and researchers within the School of Engineering at the Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín.

Keywords: Tanks system, Control laboratory, Lab equipment design.

r2013-09-13

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería es una profesión teórico-práctica en la cual los laboratorios son una herramienta esencial. Estos laboratorios se pueden clasificar en tres tipos: de desarrollo, investigación y educativos [1]. La constante evolución tecnológica ha obligado a las universidades a cambiar las metodologías de enseñanza [2], haciendo indispensables las prácticas en laboratorios como herramientas complementarias. Adicionalmente, las universidades necesitan laboratorios con equipos para investigadores donde se puede interactuar, visualizar y poner en práctica el conocimiento con el acceso a datos experimentales útiles para el desarrollo de proyectos.

En los últimos años el crecimiento industrial ha requerido la implementación de sistemas de control con el fin de estandarizar productos y procesos, y suplir la demanda del mercado. Para el aprendizaje en el tema de automatización y control es conveniente el uso de equipos y sistemas industriales, y en general las universidades no disponen de estos, por lo que se acude al uso de equipos de laboratorio didácticos a escala, que brindan una aproximación a la realidad de los procesos industriales.

La Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) cuenta con un área de automática para la formación académica enfocada a la ingeniería de control, y actualmente dispone de un laboratorio de control de procesos dotado con un sistema de tanques en serie que se encuentra obsoleto, no permite la implementación de diferentes técnicas de control ni la reconfiguración del proceso. El Grupo de Automática y Diseño A+D de la UPB ha desarrollado equipos que actualmente son usados para docen-

cia e investigación en el área de automática, particularmente en lo que a control de movimiento se refiere [3, 4], sin embargo se ha visto la necesidad de desarrollar una nueva planta para el área de control de procesos.

Este trabajo está enmarcado en un proyecto en el cual se planea desarrollar un equipo de laboratorio con componentes e instrumentación industriales que sirva para fines de investigación y docencia en el área de automática de la Escuela de Ingenierías de la UPB. El equipo será diseñado con una arquitectura que permita en el futuro la utilización de diversos algoritmos y estrategias de control, con fines de investigación, docencia (en pregrado y posgrado), y transferencia de conocimiento en control de procesos.

2. DISEÑO CONCEPTUAL

Para determinar la configuración deseada del equipo se reunió un grupo de potenciales usuarios, los cuales aportaron sus conocimientos y plantearon sus necesidades. Con esto se obtuvo un conjunto de características y requerimientos de diseño que permitieron acotar el problema y limitar las opciones de tipos de plantas usadas para el estudio de sistemas de control.

2.1. Requerimientos de diseño

Luego de analizar los requerimientos básicos y las características deseadas para el equipo de laboratorio, se llegó a que el diseño de éste debe suplir las siguientes necesidades:

- Contar con instrumentación industrial.

- Medición de las variables controladas, manipuladas, y perturbadoras.
- Permitir diferentes configuraciones para la dinámica del sistema:
 - Orden uno, orden dos y orden tres.
 - Comportamiento lineal y no lineal.
 - Tiempo muerto.
- Usar diferentes tipos de controladores industriales.
- Posibilitar la implementación de diferentes estrategias de control.
- Ser didáctico, con materiales de construcción aptos para la visualización.
- Compacto con posibilidad de transporte.

2.2. Selección de la solución

En la literatura se encuentra que los sistemas de tanques tienen presencia importante en los laboratorios de control automático dada su flexibilidad y los diferentes tipos de configuración que puede tener una planta [5, 6, 7]. Es por esto que se decide desarrollar un sistema de tanques en serie que cuente con una instrumentación robusta y necesaria para poner en práctica diferentes estrategias de control, didáctico, compacto y reconfigurable. En la Figura 1 se muestra un boceto con el diseño conceptual del sistema.

La solución propuesta contará con dos lazos que llevarán agua desde un tanque de almacenamiento hasta los dos tanques del sistema. Cada uno de estos lazos contará con transmisores de flujo. El lazo principal tendrá una válvula de control y el secundario contará con una válvula de apertura rápida

que permitirá realizar perturbaciones en los tanques. Cada tanque tendrá un transmisor de nivel. El primer tanque (superior) contará con un sistema que permita dividirlo en dos tanques pequeños interactuantes o usarlo como un solo tanque pequeño. La Tabla 1 presenta las posibles configuraciones que tendrá el sistema con su respectivo orden.

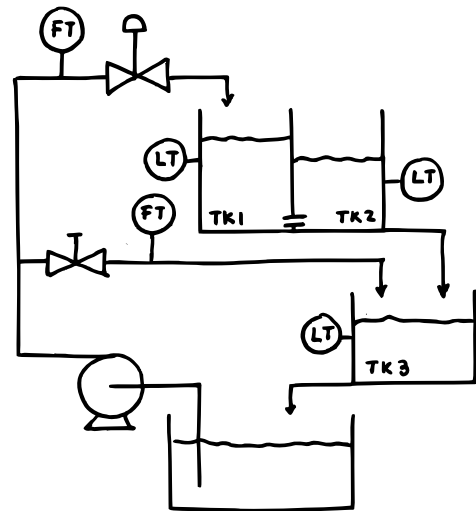


Figura 1. Diseño conceptual del sistema de tanques

Tabla 1. Posibles configuraciones

Configuración	Orden
1 tanque grande	1
1 tanque pequeño	1
2 tanques grandes en serie	2
2 tanques pequeños interactuantes	2
1 tanque pequeño y 1 tanque grande en serie	2
2 tanques pequeños interactuantes y 1 tanque grande en serie	3

El tiempo muerto se incluirá con el diseño de un serpentín removible que retarde el flujo que sale del tanque superior al tanque inferior. Las no linealidades se incluirán con el diseño de diferentes vertederos a través de los cuales sale el flujo de los tanques.

3. DISEÑO BÁSICO

Se procede a hacer un diseño con el fin de dimensionar los elementos del sistema y definir sus posiciones. Para esto se evaluaron diferentes opciones que permitan seleccionar los componentes, teniendo en cuenta criterios como material, rango de operación, tipo de conexión, costo, seguridad, mantenimiento, entre otros.

3.1. Selección de elementos

Una restricción impuesta al diseño es que los laboratorios cuentan con una bomba y una válvula de control nuevas, compradas previamente y alrededor de las cuales se dimensionan los demás elementos. La bomba es una Pedrollo CP620D, y proporciona un caudal máximo de 6 m³/h. La válvula es una Spirax-Sarco LEA31, y cuenta con un actuador neumático PN9120E y un posicionador SP5000. Teniendo en cuenta las limitaciones, se seleccionaron los demás elementos comerciales y se realizó un diseño aproximado de los elementos que requieren ser fabricados. La Figura 2 muestra un diseño base del sistema que se realizó como punto de partida para luego evolucionar en el diseño detallado.

3.2. Instrumentación

La selección de la instrumentación se realizó con ayuda de expertos en el tema de control de procesos, y se hizo con base en los datos nominales de la bomba y la válvula de control. Se seleccionaron 3 transmisores de presión diferencial Siemens Sitrans P DS III que serán ubicados en cada uno de los tanques (variables controladas), y 2 transmisores electromagnéticos de flujo Siemens Sitrans MAG 5100W los cuales estarán instalados, uno en la tubería principal (variable manipulada), y el otro en la secundaria (variable perturbadora). Se usará un compresor KTC 431-2525 dedicado exclusivamente a la válvula de control. La bomba contará con un variador de velocidad Yaskawa J1000. La Tabla 2 muestra los sensores y actuadores que tiene el equipo, y la función que cada uno desempeña.

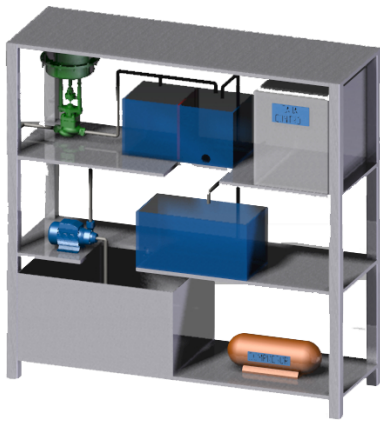


Figura 2. Diseño básico del sistema de tanques

Dado que se requiere una plataforma que permita implementar sistemas clásicos y sistemas avanzados de control, se usará un PLC Siemens Simatic S7-1200 con módulos de entradas y salidas análogas como sistema de adquisición de datos. Se tendrá la posibilidad de hacer control directamente con el PLC, y la posibilidad de usarlo como sistema de manejo de señales de entrada y salida, comunicado con LabVIEW o con un controlador industrial Foxboro 762CNA. El control de las variables se podrá realizar desde el PLC, desde LabVIEW o desde el controlador Foxboro, según sea el caso que quiere estudiar y el propósito de utilización (investigación o docencia).

Tabla 2. Instrumentación del equipo

Elemento	Función
Válvula de Control	Controlar flujo lazo principal
Sensor PD 1	Sensar nivel tanque 1
Sensor PD 2	Sensar nivel tanque 2
Sensor PD 3	Sensar nivel tanque 3
Sensor de flujo 1	Sensar flujo lazo principal
Sensor de flujo 2	Sensar flujo lazo secundario
Compresor	Alimentar válvula de control
Variador de velocidad	Variar velocidad de bomba
Bomba	Alimentar el fluido al sistema

4. DISEÑO DE DETALLE

Luego de la selección de los componentes comerciales del sistema, se procede a hacer un análisis de los elementos a fabricar, como los tanques y vertederos, y se dispone a diseñar la estructura. En este paso del proceso de diseño se estructura además la conexión física de los componentes. Para esto se hizo un proceso iterativo hasta llegar al diseño final que satisface las necesidades planteadas en el diseño conceptual.

4.1. Dimensionamiento de vertederos

Se dimensionaron vertederos lineales y no lineales intercambiables para ambos tanques teniendo en cuenta el caudal máximo que puede proporcionar la bomba. La Tabla 3 muestra los tipos de vertederos, según la relación entre el caudal de salida

Q , y altura del líquido en el tanque H . La Figura 3 muestra las dimensiones y formas de los vertederos calculados.

Tabla 3. Tipos de vertedero [8]

Tipo	Ecuaciones
Rectangular	$Q = 1.838(L - (2H)/10)H^{3/2}$
Triangular	$Q = 1.4H^{5/2}$
Circular	$Q = 1.518D^{0.693}H^{1.807}$
Proporcional	$Q = K L\sqrt{a}(H + 5a/8)$

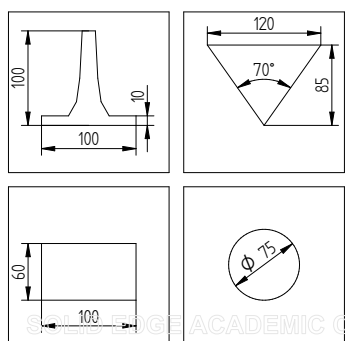


Figura 3. Dimensión de vertederos (medidas en mm)

4.2. Dimensionamiento de tanques

El tamaño de los tanques se determinó teniendo en cuenta que la medición de altura en un tanque con vertedero se debe tomar aguas arriba a una distancia mínima de 5 veces la altura de éste. Para definir la altura del tanque se tuvo en cuenta el rango del transmisor de presión diferencial y la altura de los vertederos. Los tanques serán construidos en acrílico transparente para mejorar la visualización del proceso.

Es importante que el agua que llega por la tubería no genere mucho oleaje en la superficie. Para lograr esto se diseñaron unos atenuadores internos en cada tanque (baffles), calculando el caudal que pasa a través de estos con el fin de evitar que el agua se rebose, usando la relación $Q = C_d A \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$. La Figura 4 ilustra este diseño.

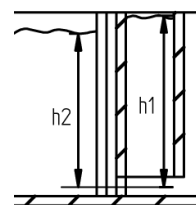


Figura 4. Atenuador

Para el tanque de almacenamiento se calculó el volumen de agua que cabe en la tubería y se supone que ambos tanques se encuentran totalmente llenos. De este modo se encuentra

el volumen mínimo que debe almacenar el tanque para que el sistema funcione correctamente.

4.3. Estructura

Se estudiaron diferentes configuraciones de la estructura hasta llegar a una que fuera rígida y en la cual se puedan ubicar los diferentes elementos que conforman el sistema. La estructura cuenta con tres niveles. En el primer nivel se encuentra ubicado el tanque de acumulación de agua y un gabinete donde se ubicará el compresor y diferentes accesorios del sistema como son los vertederos, mangueras, entre otros. En el segundo nivel estará ubicado uno de los tanques de acrílico. En el tercer nivel se ubicará el otro tanque de acrílico y el gabinete de control, en el cual se encontrarán los elementos eléctricos, el variador de velocidad, el PLC y el controlador industrial Foxboro. La estructura se construirá en perfiles de aluminio extruido, ya que es un material ligero, de buena resistencia y que presenta una apariencia visualmente agradable.

5. PROTOTIPO VIRTUAL

Con el diseño del sistema listo se realizó un prototipo virtual en un programa de diseño asistido por computador CAD, SolidEdge®. El prototipo virtual permite verificar dimensiones y visualizar posibles problemas antes de la manufactura. La Figura 5 muestra el prototipo virtual detallado.

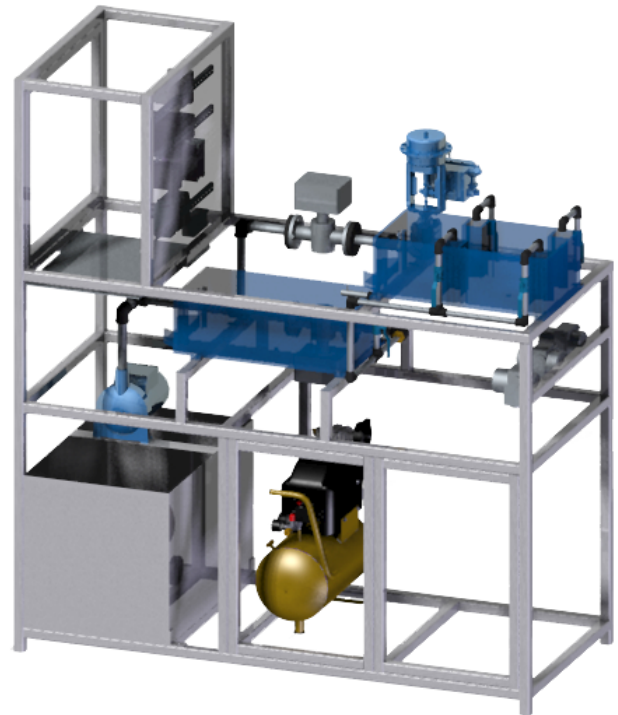


Figura 5. Prototipo virtual

6. CONCLUSIONES

Se realizaron los diseños conceptual, básico y de detalle para un sistema de tanques en serie que cuenta con instrumentación industrial para implementar diferentes estrategias de control.

El sistema diseñado cumple con las especificaciones y características deseadas, y será una herramienta útil para el estudio de estrategias de control, tanto en actividades de docencia (en pregrado y posgrado), como en actividades de investigación y transferencia de conocimiento en la Universidad Pontificia Bolivariana.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo está enmarcado en el proyecto “Estudio comparativo de estrategias avanzadas de control en un sistema de tanques”, radicado 025B-02/13-22, y es financiado por el Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación – CIDI y la Dirección de Laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín.

REFERENCIAS

- [1] Feisel, L. D., and Rosa, A. J., 2005. “The role of the laboratory in undergraduate engineering education”. *Journal of Engineering Education*, **94**, Enero, pp. 121–130.
- [2] Domínguez, M., Reguera, P., and Fuertes, J., 2005. “Laboratorio remoto para la enseñanza de la automática en la Universidad de Leon (España)”. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **2**(2), Abril, pp. 36–45.
- [3] Vásquez, R., Correa, J., Tamayo, S., and Vásquez, J., 2007. “Development of a laboratory equipment for the analysis of mechanisms”. In *Proceedings of the ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol. 7, pp. 179–185.
- [4] Betancur, M., Carvajal, J., Congote, L., Díaz, D., and Rincón, E., 2008. “Desarrollo de un equipo didáctico para prácticas de control de tensión en un cabezote textil”. In *Memorias de XVIII INGENIAR*.
- [5] García, A. A., Berenguel, M., Guzmán, J., Dormido, S., and Domínguez, M., 2005. “Laboratorio remoto para el proceso de los cuatro tanques y su aplicación en docencia de control multivariable”. In *Actas de la IV Jornadas de Enseñanza a través de Internet/Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática*.
- [6] Horacek, P., 2000. “Laboratory experiments for control theory courses: a survey”. *Annual Reviews in Control*, **24**, pp. 151–162.
- [7] Morilla, F., Isabel, A., and Sánchez, J., 2002. “Entorno de experimentación sobre control de nivel y control de caudal”. In *Memorias de las XXIII Jornadas de Automática, Comité Español de Automática*.
- [8] de Azevedo-Netto, J., Fernandez y Fernandez, M., de Araujo, R., and Eiji-Ito, A., 1998. *Manual de hidráulica*, 8 ed. Editora Edgard Blucher.

AUTORES



David GIRALDO, nacido en Medellín, Colombia. Estudiante de Ingeniería Mecánica de la UPB.



Rafael E. VÁSQUEZ, nacido en Medellín, Colombia; Ingeniero Mecánico (UPB, 2002); Especialista en Automática (UPB, 2004); Magíster en Ingeniería, área de automática (UPB, 2007); Doctor en Ingeniería Mecánica, área de dinámica, sistemas y control (University of Florida, 2011); miembro de la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos ASME; con intereses de investigación en robótica, mecatrónica, control de procesos, control de sistemas mecánicos, teoría de control y nuevas formas de generación de energía; actualmente Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Mecánica y coordinador del Grupo de Automática y Diseño A+D perteneciente a la Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana – Medellín.

C. ANTEPROYECTO

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA EL ESTUDIO
DE ESTRATEGIAS DE CONTROL**

DAVID GIRALDO DURANGO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN**

2013

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE TANQUES PARA EL ESTUDIO
DE ESTRATEGIAS DE CONTROL**

DAVID GIRALDO DURANGO

Anteproyecto

Director

RAFAEL ESTEBAN VÁSQUEZ MONCAYO
Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN

2013

CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2. JUSTIFICACIÓN	7
3. OBJETIVOS	8
3.1. General	8
3.2. Específicos	8
4. MARCO REFERENCIAL	9
5. METODOLOGÍA	11
5.1. Diseño	11
5.2. Construcción	11
5.3. Montaje	12
6. RECURSOS	13
6.1. Humanos	13
6.2. Institucionales	13
7. PRESUPUESTO	14
8. CRONOGRAMA	15
9. PRODUCTOS ESPERADOS	16

10. IMPACTO AMBIENTAL	17
BIBLIOGRAFÍA	18

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Presupuesto	14
2 Cronograma	15

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años el crecimiento industrial ha requerido la implementación de sistemas de control para estandarizar los productos y procesos, y suplir la demanda del mercado. Los sistemas de control son importantes para lograr mantener controladas las variables de un proceso y minimizar costos operacionales en la industria, proporcionando el aumento en la rentabilidad de sus productos.

La Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) cuenta con un área de automática para la formación académica enfocada a la ingeniería de control. Actualmente se dispone de un laboratorio de control de procesos para los estudiantes de pregrado y posgrado dotado con un sistema de tanques en serie que se encuentra obsoleto, es un montaje poco flexible, y no permite la implementación de diferentes técnicas de control o la reconfiguración del proceso.

2. JUSTIFICACIÓN

Para el estudio y comparación de diferentes técnicas de control y métodos de sintonía de controladores, el Grupo de Automática y Diseño A+D de la UPB ha realizado diversos trabajos a nivel de simulación [Vásquez and Castrillón2006, Castrillón and Ocampo2009, Agudelo et al.2010, Vásquez and Castrillón2010, Castellanos and Castrillón2012], y algunos a nivel de implementación práctica en una planta que se encontraba ubicada en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la institución [Vásquez and Vásquez2004, Castrillón and Vásquez2007] y que ya no está disponible.

Este grupo ha desarrollado equipos que actualmente son usados para docencia, investigación y extensión en el área de automática, particularmente en lo que a control de movimiento se refiere [Vásquez et al.2007, Betancur et al.2008], sin embargo se ha visto la necesidad de desarrollar una planta adecuada para el área de control de procesos.

Se propone diseñar un sistema de tanques en serie dotado con la instrumentación necesaria para el estudio y comparación de las técnicas de control que podrá ser usado por estudiantes de pregrado y posgrado de la universidad, además podrá prestar servicios a otras instituciones. El sistema será útil y de apoyo para los docentes de pregrado porque les permitirá realizar diferentes prácticas con los estudiantes, en los cuales se afianzarán los conocimientos teóricos y posibilitará simular diferentes condiciones de operación. Los estudiantes de posgrado podrán poner en práctica diferentes técnicas de control clásicas y avanzadas útiles para sus estudios.

El proyecto contribuirá con el fortalecimiento de las líneas de automatización y teoría de control del Grupo A+D. Esto permitirá que se aumente la capacidad de producción científica y la transferencia de conocimiento. Este trabajo de grado está enmarcado dentro del proyecto “Estudio comparativo de estrategias avanzadas de control en un sistema de tanques”, radicado 025B-02/13-22 y se desarrollará con la financiación del Centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación - CIDI, y la dirección de laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana.

3. OBJETIVOS

3.1. GENERAL

Desarrollar un sistema de tanques en serie compacto, reconfigurable y didáctico para fines de control.

3.2. ESPECÍFICOS

- Diseñar un sistema de tanques en serie que cuente con la instrumentación necesaria para la implementación de estrategias de control.
- Construir el sistema de tanques incluyendo el montaje de la instrumentación necesaria para realizar tareas de control.
- Realizar el montaje del sistema en los laboratorios de ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana.

4. MARCO REFERENCIAL

La ingeniería es una profesión práctica que va más allá de la teoría, es por esto que los laboratorios son una herramienta esencial. Se debe diferenciar tres tipos de laboratorios de ingeniería: de desarrollo, investigación y educativos. Los primeros permiten extraer datos para resolver y analizar puntos específicos de un diseño o un producto, los de investigación aportan al conocimiento general de un tema, y los educativos buscan que los estudiantes aprendan sobre algo que los ingenieros en práctica deberían saber, dándoles la oportunidad de experimentar y tratar con problemas y situaciones reales [Feisel and Rosa2005]. La constante evolución y la complejidad tecnológica han obligado a los docentes a cambiar las metodologías de enseñanza [Domínguez et al.2005], lo que hace indispensable prácticas en laboratorios como una herramienta complementaria de enseñanza y aprendizaje. Además es esencial el uso de los laboratorios para investigadores, siendo un espacio donde se puede interactuar, visualizar y poner en práctica el conocimiento y donde se puede obtener datos experimentales útiles para el desarrollo de proyectos.

Para el aprendizaje en el tema de automatización y control es conveniente el uso de equipos y sistemas industriales y en general las universidades no disponen de estos, por lo que se acude al uso de equipos de laboratorio didácticos a escala, que brindan una aproximación a la realidad de los procesos industriales.

Actualmente existen universidades que cuentan con laboratorios de control automático. Algunas universidades españolas como la Universidad de León y la Universidad Nacional de Educación a Distancia han desarrollado numerosas investigaciones y proyectos acerca de laboratorios virtuales y remotos en aplicaciones de control que tiene como objetivo mejorar el proceso educativo logrando mayor interactividad del alumno durante su aprendizaje [Domínguez et al.2005, Duro et al.2005, García et al.2005, Dormido et al.2008, Dormido et al.2000, Aliane et al.2007]. La Universidad de Kragujevac en Serbia cuenta con un laboratorio de control que puede ser operado en forma remota brindando a los estudiantes la oportunidad de su uso en cualquier momento del día, cualquier día

de la semana, además el laboratorio puede ser compartido entre varias instituciones [Stefanovic et al.2009]. En Venezuela, la Universidad de los Andes cuenta con un laboratorio virtual que permite a los estudiantes realizar prácticas de una forma similar a como si estuviera en un laboratorio real [Márquez and Cárdenas2008].

Para un laboratorio de control automático los sistemas de tanques son equipos importantes dado que proporcionan flexibilidad y permiten diferentes tipos de configuraciones en el sistema para fines de control [García et al.2005, Horacek2000, Morilla et al.2002]. En la escuela de ingenierías de la UPB se han realizado trabajos de grado relacionados con el diseño de sistemas de tanques en serie [Gómez and Orózco2006], sin embargo se ha visto la necesidad de desarrollar una planta adecuada para el área de control de procesos.

La UPB tiene como misión aportar a la formación integral de las personas que la constituyen, siendo algunos de sus componentes la búsqueda de la verdad en los procesos de docencia e investigación, para el bien de la sociedad [Flórez et al.2009]. El desarrollo de este trabajo de grado fortalece la formación de ingenieros íntegros brindando la posibilidad de innovar, crear e investigar, permitiendo a su vez que éstos se enfrente a la concepción, diseño, implementación y operación de procesos y sistemas, puntos importantes para procesos de autoevaluación y acreditación internacional basados en metodologías como ABET y CDIO [Crawley et al.2007]. Adicionalmente ofrece, a diferentes ingenierías, la posibilidad de ponerse a tono con tendencias curriculares contemporáneas, particularmente en el cumplimiento de las *outcomes* b, c, d, e y k propuestas por ABET [Spurlin et al.2008].

5. METODOLOGÍA

5.1. DISEÑO

Se diseñará un sistema de tanques en serie compacto que cuente con la instrumentación necesaria para fines de control. Primero se revisarán las necesidades y se determinará la configuración adecuada del sistema. Se seleccionarán los instrumentos de medición teniendo en cuenta los rangos de las variables y las características eléctricas de los módulos de entrada del PLC que permitirá la comunicación con los sensores y los actuadores. Se calcularán las dimensiones de los tanques adecuadas para el rango de flujo de la válvula de control. Se dimensionarán vertederos lineales y no lineales para ambos tanques. Se usará software de programación de alto nivel (Matlab®) para cálculos y dimensionamiento de los elementos requeridos. Se usará un sistema de diseño asistido por computador CAD (Solid-Edge®) para el desarrollo del prototipo virtual detallado que permitirá verificar dimensiones y posibles problemas antes de la fabricación. Adicionalmente se diseñará el gabinete para los elementos que están involucrados en el sistema de tanques. Al final de esta etapa se espera tener planos mecánicos y de instrumentación y tubería detallados para fines de fabricación y montaje.

5.2. CONSTRUCCIÓN

El sistema de tanques se construirá en talleres locales y haciendo uso del laboratorio de máquinas y herramientas de la UPB a partir de los planos mecánicos y de instrumentación y tubería detallados obtenidos en la primera etapa. Se planea construir cada tanque en material transparente (posiblemente acrílico) para mejorar la visualización. Se planea usar perfilera de aluminio para la construcción de la estructura que soportará los tanques, la bomba, la instrumentación, el compresor, el gabinete y demás accesorios

requeridos en el sistema. Se espera tener todos los elementos fabricados y listos para realizar el montaje del sistema.

5.3. MONTAJE

Se realizará el montaje del sistema con toda la instrumentación. Se ejecutarán pruebas con el fin de verificar el estado de los elementos. Se harán las correcciones necesarias en los planos mecánicos y de instrumentación y tubería. Al final de esta etapa se espera tener el sistema funcionando, y los planos mecánicos y de instrumentación y tubería definitivos del sistema.

6. RECURSOS

6.1. HUMANOS

Estudiante: David Giraldo Durango

Cédula: 1.152.440.623

ID: 77274

Programa: Ingeniería Mecánica

Teléfono: 304 434 6922

E-mail: david.giraldodu@alfa.upb.edu.co

Tiempo de dedicación: 520 horas

Director: Rafael Esteban Vásquez Moncayo, Ph.D.

Cédula: 71.791.914

ID: 8718

Programa: Ingeniería Mecánica

Empresa: Universidad Pontificia Bolivariana

Teléfono: 448 8388 Ext. 14165

E-Mail: rafael.vasquez@upb.edu.co

Tiempo de dedicación: 56 horas

6.2. INSTITUCIONALES

Este trabajo de grado está enmarcada dentro del proyecto “Estudio comparativo de estrategias avanzadas de control en un sistema de tanques” y se desarrollará con la financiación de la Universidad Pontificia Bolivariana.

7. PRESUPUESTO

En la Tabla 1 se presenta el costo del proyecto y su financiamiento.

Tabla 1. Presupuesto

Recursos	Participación		Implica desembolso	
	Estudiante	UPB	SI (Nuevo)	NO (Existente)
Bibliografía		X		1.500
Papelería	X		200	
Computador e internet	X			1.000
Transporte	X		850	
Tiempo del estudiante \$/h 2.000	X			320
Tiempo del director \$/h 60.000		X		9.600
Equipos		X	18.600	8.400
Servicios técnicos		X	1.500	
Materiales e insumos		X	1.600	
Subtotal			22.750	20.820
Imprevistos (10%)			2.275	2.082
COSTO TOTAL				47.927

*Valores en miles de pesos

8. CRONOGRAMA

El trabajo de grado se iniciará en el mes de marzo de 2013, y tendrá una duración de 8 meses. En la Tabla 2 se muestran las actividades a realizar mes a mes.

Tabla 2. Cronograma

ACTIVIDAD	MES								Horas de trabajo
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Determinación de la configuración del sistema	X								10
Selección de la instrumentación	X	X							10
Compra de elementos		X	X						25
Dimensionamiento de los tanques		X	X						15
Dimensionamiento de vertederos		X	X						10
Prototipo virtual		X	X	X					80
Planos mecánicos				X					30
Planos de instrumentación y tubería				X					15
Fabricación y montaje					X	X			175
Escritura de artículos							X		50
Escritura del trabajo de grado		X	X	X	X	X	X	X	100
Proceso de revisión y aprobación								X	—
Total horas									520

9. PRODUCTOS ESPERADOS

El trabajo de grado se desarrollará de forma teórica y práctica, por lo cual se espera entregar el diseño de un prototipo virtual y realizar el montaje del sistema de tanques. Además elaborar el documento donde se encuentre recopilada la información obtenida durante la ejecución del proyecto, como memorias de cálculo, planos generales y de detalle del sistema, y un artículo publicable.

10. IMPACTO AMBIENTAL

La ejecución del trabajo de grado no generará un impacto ambiental considerable.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Vásquez and F. Castrillón, “Comparación de diferentes técnicas adicionales para el control de procesos,” *XII Congreso Latinoamericano de Control Automático CLCA*, 2006.
- [2] F. Castrillón and J. Ocampo, “Sintonía de sistemas de control en cascada. comparación de diferentes métodos,” *Ingeniería Química*, vol. 473, pp. 6–70, 2009.
- [3] S. Agudelo, E. Ortiz, R. Vásquez, and F. Castrillón, “Comparación de técnicas adicionales de control,” *Ingeniería Química*, vol. 484, pp. 62–69, 2010.
- [4] R. Vásquez and F. Castrillón, “Decrease of the energetic consumption in process control,” in *ASME Conference Proceedings*, 2010.
- [5] D. Castellanos and F. Castrillón, “Controladores PI/PID en procesos con respuesta inversa, evaluación de la robustez,” *Ingeniería Química*, vol. 502, pp. 48–52, 2012.
- [6] R. Vásquez and J. Vásquez, “Implementación de un control digital en un PC para un proceso de flujo,” *VI Congreso nacional de la Asociación Colombiana de Automática*, 2004.
- [7] F. Castrillón and R. Vásquez, “Estrategias para compensar no linealidades generadas por válvulas en lazos de control del flujo,” *CIT Información Tecnológica*, vol. 18, pp. 161–168, 2007.
- [8] R. Vásquez, J. Correa, S. Tamayo, and J. Vásquez, “Development of a laboratory equipment for the analysis of mechanisms,” in *ASME Conference Proceedings*, 2007, pp. 179–185.
- [9] M. Betancur, J. Carvajal, L. Congote, D. Díaz, and E. Rincón, “Desarrollo de un equipo didáctico para prácticas de control de tensión en un cabezote textil,” in

Memorias de XVIII INGENIAR, 2008.

- [10] L. D. Feisel and A. J. Rosa, “The role of the laboratory in undergraduate engineering education,” *Journal of Engineering Education*, vol. 94, pp. 121–130, Enero 2005.
- [11] M. Domínguez, P. Reguera, and J. Fuertes, “Laboratorio remoto para la enseñanza de la automática en la Universidad de Leon (España),” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 2, no. 2, pp. 36–45, Abril 2005.
- [12] N. Duro, H. Vargas, R. Dormido, S. Dormido, and J. Sánchez, “El sistema de tres tanques: un laboratorio virtual y remoto usando easy java simulations,” in *Actas de la IV Jornadas de Enseñanza a través de Internet/Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática*, 2005.
- [13] A. A. García, M. Berenguel, J. Guzmán, S. Dormido, and M. Domínguez, “Laboratorio remoto para el proceso de los cuatro tanques y su aplicación en docencia de control multivariable,” in *Actas de la IV Jornadas de Enseñanza a través de Internet/Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática*, 2005.
- [14] S. Dormido, H. Vargas, J. Sánchez, N. Duro, S. Dormido-Canto, and F. Morilla, “Developing and implementing virtual and remote labs for control education: The uned pilot experience,” in *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, 2008.
- [15] S. Dormido, J. Sánchez, and F. Morilla, “Laboratorios virtuales y remoto para la práctica a distancia de la automática,” in *XXI Jornadas de Automática*, 2000.
- [16] N. Aliane, J. Fernández, A. Martínez, and J. Ortiz, “Un laboratorio de ingeniería de control basado en internet,” *Información Tecnológica*, vol. 18, no. 6, pp. 19–26, 2007.
- [17] M. Stefanovic, V. Cvijetkovic, M. Matijevic, and V. Simic, “A labview-based remote laboratory experiments for control engineering education,” *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 19, pp. 538–549, Febrero 2009.
- [18] D. Márquez and O. Cárdenas, “Implementación de un laboratorio virtual para la enseñanza de controladores PID,” *Información Tecnológica*, vol. 19, no. 3, pp. 75–78, 2008.

- [19] P. Horacek, “Laboratory experiments for control theory courses: a survey,” *Annual Reviews in Control*, vol. 24, pp. 151–162, 2000.
- [20] F. Morilla, A. Isabel, and J. Sánchez, “Entorno de experimentación sobre control de nivel y control de caudal,” *XXIII Jornadas de Automática*, 2002.
- [21] A. Gómez and J. Orózco, “Diseño integrado de un sistema de tanques en cascada,” Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, 2006.
- [22] D. Flórez, J. Vásquez, P. Gañán, M. Giraldo, and B. Galeano, *Proyecto Educativo-Programa de Ingeniería Mecánica*, C. I. UPB, Ed. Centro Imagen UPB, 2009.
- [23] E. Crawley, J. Malmqvist, S. Ostlund, and D. Brodeur, *Rethinking Engineering Education*. Springer, 2007.
- [24] J. Spurlin, S. Rajala, and J. Lavelle, *Designing Better Engineering Education Through Assessment*. Stylus Publishing, 2008.