



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Implementación del gemelo digital de un
proceso de tanques atmosféricos
interconectados

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA

Miguel García Santamaría

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Hoover Mujica Ortega



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Jurado asignado

Presidente: M.I. Gloria Correa Palacios
Secretario: M.F. Gabriel Hurtado Chong
Vocal: Dr. Hoover Mujica Ortega
1^{er} suplente: Dr. Jose Daniel Castro Diaz
2^{do} suplente: Ing. Jeshua Perea Constantino

Ciudad Universitaria, Departamento de Control y Robótica, Laboratorio de
Automatización.

Ciudad de México.

Director de tesis

Dr. Hoover Mujica Ortega

Dedicatoria

Este trabajo de tesis se lo quiero dedicar especialmente a mis padres Irma y Miguel, que más que mía es de ellos y para ellos, ya que gracias a su consejo, su guía y a todo su apoyo durante toda mi carrera y la de mis hermanos, son los forjadores de la persona que soy ahora y que sin su bendición no lo hubiera logrado.

Agradecimientos

Primeramente agradezco a mis padres, porque siempre me han brindado su apoyo incondicional, su confianza en mi y en mis decisiones con base en su experiencia que siempre me han compartido.

A mis hermanos, por tener su apoyo incondicional, motivación y consejos, por ser para mí un ejemplo de dedicación, perseverancia y entrega. Por ser mi mano derecha y remar a mi lado en este largo camino llamado vida.

A toda mi familia, que sin ella no sería lo que soy en este momento, en especial a mi tía Yolanda, mi prima Diana y mis sobrinas Paula, Camila, Carolina y Carlitos, por su gran amor, motivación y apoyo incondicional, por lo que significan mucho para mí.

A mi profesor, amigo y asesor de tesis, el Dr. Hoover Mujica Ortega, por aceptarme para desarrollar tema de tesis con él, por la confianza, la amistad, así como por la dedicación, gran compromiso y por compartir sus valiosos conocimientos para la realización de esta tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de su comunidad estudiantil y por brindarme todas las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional, así como también a todos mis profesores que compartieron día con día sus valiosos conocimientos siendo el pilar principal de mi avance dentro de la carrera, así como por su gran apoyo.

A la Facultad de Ingeniería, por todas las enseñanzas, conocimientos y herramientas que nos proporciona para formarnos como ingenieros ejemplares para nuestro país.

A mis amigos de carrera y de la vida porque sigo aprendiendo de ellos y por seguir siendo parte de mi vida fuera de la escuela.

A todos mis compañeros de carrera con los que compartí y disfruté cada momento durante estos años.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM por el apoyo y la beca brindada en el Proyecto UNAM-PAPIME PE109121.

Resumen

La tendencia actual de la industria de manufactura en cuanto a procesos de fabricación se encuentra en constante evolución con el fin de generar la mayor flexibilidad y adaptación de procesos nuevos a productos de mayor complejidad que demandan más recursos y tiempo. En este escenario es donde emerge el concepto gemelo digital, ya que el ciclo de vida del producto en cualquier etapa requiere de automatización y pruebas que suponen un gasto económico y de tiempo durante el desarrollo y monitoreo de cada etapa de producción de productos nuevos.

El gemelo digital desarrollado fue pensado a modo que los alumnos del laboratorio pudieran generar secuencias de control y probarlas directamente en la representación virtual instalada en cada computadora, permitiendo la interacción simultánea con la planta hidráulica virtual sin comprometer la integridad del equipo físico y de los operadores por alguna mala secuencia de control.

El trabajo desarrollado en esta tesis está pensado para ubicarse en el nivel de sofisticación *Digital Twin Environment* conformado a su vez por un *Digital Twin Prototype* o modelo paramétrico 3D que describe al prototipo físico. Con la ayuda de software destinado al diseño asistido por computadora se detalló a gran nivel los componentes de la planta hidráulica consultando sus características físicas como de funcionamiento en hojas y manuales técnicos y así representar el comportamiento interno de los componentes principales.

Se propuso un modelo matemático mediante ecuaciones diferenciales no lineales que refleja la dinámica del fluido dentro de la planta hidráulica que reacciona a perturbaciones generadas por los elementos de control acoplados a ella como las distintas válvulas de control de flujo. El modelo matemático se evaluó mediante la ejecución de distintos escenarios de llenado y vaciado de tanques cuyos resultados fueron cotejados con pruebas en la planta física obteniendo una buena aproximación de los resultados y logrando que el modelo matemático reaccione a perturbaciones generadas por los elementos de control en tiempo real. Se vislumbra también que el gemelo digital es capaz de brindar información sobre el estado de los componentes principales y su exigencia, característica propia de los gemelos digitales predictivos.

Al integrar la información obtenida del modelo matemático con la representación virtual se obtiene una herramienta de software que es centralizada, eficaz y reproducible en la que los operadores pueden experimentar y acelerar la obtención del conocimiento, así como identificar y clasificar oportunidades de optimización del control del proceso estudiado, con ello, acentuar el hecho de respaldar la toma de decisiones sin desperdiciar recursos valiosos.

Índice general

Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xvii
Acrónimos	xix
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Formulación del problema	4
1.4. Objetivos	4
1.5. Contribuciones	5
1.6. Organización de la tesis	5
2. Marco teórico	7
2.1. Industria 4.0	7
2.1.1. Definición	7
2.1.2. Retos de la industria actual	7
2.1.3. Gemelo Digital	8
2.2. Hidráulica	11
2.3. Elementos de regulación de presión y flujo	12
2.3.1. Válvulas de control	12
2.3.2. Válvulas de corte	13
2.4. Dispositivos de medición de velocidad y flujo	14
2.4.1. Placa de orificio	15
2.4.2. Sensores de presión diferencial	17
2.5. Tanques atmosféricos	18
2.5.1. Tipos de tanques atmosféricos	19
2.5.2. Elementos que conforman un tanque atmosférico	21
2.5.3. Medidores de nivel	21
2.6. Mecánica de fluidos	22
2.6.1. Ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía para volúmenes de control	23
2.7. Flujo en tuberías	23
2.8. Manometría y viscosimetría	24
2.9. Diseño asistido por computadora (CAD)	25

3. Implementación del gemelo digital	27
3.1. Modelo tridimensional de la planta hidráulica	27
3.1.1. Modelo tridimensional de válvula hidráulica de control Orion serie 9000	30
3.1.2. Modelo tridimensional de válvula hidráulica de corte Swagelok SS-65TS16	32
3.1.3. Modelo tridimensional de válvula neumática MAC Series 900	35
3.1.4. Modelo tridimensional de placa de orificio Emerson	36
3.1.5. Modelo tridimensional de rotámetro Fischer&Porter	37
3.1.6. Modelo tridimensional de tanque de techo abierto	38
3.1.7. Modelo tridimensional de tanque de techo cerrado	39
3.1.8. Modelo tridimensional de manómetro	39
3.1.9. Modelo tridimensional de transductor Fisher 646	40
3.1.10. Modelo tridimensional de regulador de filtro Fisher 67CFR	41
3.1.11. Modelo tridimensional de Transmisor de presión diferencial SMAR LD301	43
3.1.12. Modelo tridimensional de Transmisor de presión diferencial Moore Serie 340D	44
3.2. Modelo matemático del sistema físico	47
3.2.1. Dinámica de los componentes hidráulicos	48
3.2.2. Modelo completo	53
3.3. Implementación del modelo matemático	53
3.3.1. Bomba Centrífuga	54
3.3.2. Dinámica del nivel de fluido en un tanque	55
3.3.3. Continuidad de flujo aplicada a la bifurcación de la tubería	57
3.3.4. Continuidad de flujo caso 1. Bifurcación secundaria	58
3.3.5. Continuidad de flujo caso 2. Bifurcación principal	59
3.3.6. Continuidad de flujo caso 3. Factor de caudal dependiente	60
3.3.7. Diagrama de bloques en Matlab/Simulink	61
4. Evaluación del gemelo digital	63
4.1. Pruebas de evaluación	63
4.1.1. Llenado del tanque de techo abierto mediante el grifo de suministro de agua	63
4.1.2. Descarga o purga del tanque de techo abierto	65
4.1.3. Caudal máximo de transferencia de líquido del tanque abierto al tanque cerrado con apertura de válvulas de transferencia al 100 por ciento y válvulas de recirculación cerradas	66
4.1.4. Caudal máximo de transferencia de líquido del tanque de techo cerrado al tanque de techo abierto	68
4.1.5. Transferencia de líquido del tanque abierto al tanque cerrado con suministro externo, desborde de tanque de techo cerrado, apertura de válvulas de transferencia al 100 por ciento y válvulas de recirculación cerradas	68
4.1.6. Transferencia de líquido del tanque abierto al tanque cerrado con apertura de toda válvula al 100 por ciento	69
4.1.7. Transferencia de líquido del tanque abierto al tanque cerrado con apertura de toda válvula al 100 por ciento con suministro externo y desborde	70
4.1.8. Nivel de líquido invariable con ambas bombas encendidas, válvulas de transferencia abiertas al 100 por ciento y válvulas de recirculación cerradas	70
4.2. Discusión de los resultados	72

5. Conclusiones	73
5.1. Trabajo a futuro	74
Apéndice A. Planos de ensamble de los componentes del sistema de control de caudal de la planta hidráulica	75
Apéndice B. Diagramas de bloques en Matlab/Simulink	85
Apéndice C. Código fuente en Matlab/Simulink	87
C.1. Código completo del modelado de tanque de techo abierto y bomba centrífuga	87
C.2. Código completo del modelado de tanque de techo cerrado y bomba centrífuga	90
Referencias	93

Índice de figuras

1.1. Implementación de gemelo digital bidireccional.	3
2.1. Elementos de un sistema hidráulico	11
2.2. Válvula de control Series 9000	12
2.3. Válvula de corte Swagelok SS-65TS16	14
2.4. Rotámetro Fischer&Porter	15
2.5. Placa de orificio	16
2.6. Transmisores de presión diferencial	18
2.7. Tipos de tanques atmosféricos	20
2.8. Sensor de nivel de conductividad Warrick controls 3E2C	22
3.1. Planta hidráulica	28
3.2. Ensamble del modelo paramétrico de planta hidráulica	29
3.3. Válvula de control Orion serie 9000	31
3.4. Ensamble del modelo paramétrico de válvula de control serie 9000	31
3.5. Especificaciones técnicas de válvula de control Orion Serie 9000	32
3.6. Válvula de corte Swagelok SS-65TS16	33
3.7. Ensamble del modelo paramétrico de válvula de corte Swagelok	33
3.8. Modelo paramétrico de válvula neumática	35
3.9. Placa de orificio Emerson	36
3.10. Ensamble del modelo paramétrico de placa de orificio Emerson	36
3.11. Ensamble del modelo paramétrico de rotámetro Fisher&Porter/ABB	37
3.12. Ensamble del modelo paramétrico de tanque de techo abierto	38
3.13. Ensamble del modelo paramétrico de tanque de techo cerrado	39
3.14. Ensamble del modelo paramétrico de manómetro	40
3.15. Ensamble del modelo paramétrico de transductor Fisher 646	41
3.16. Ensamble del modelo paramétrico de regulador de filtro Fisher 67CFR	42
3.17. Esquema de operación de regulador serie 67C	42
3.18. Localización de las tomas de presión	43
3.19. Bloque de conexión eléctrica	43
3.20. Ensamble del modelo paramétrico de transmisor de presión diferencial SMAR LD301	44
3.21. Modelo paramétrico de transmisor de presión diferencial Moore 340D	45
3.22. Instalación del transmisor por debajo del nivel mínimo en tanques atmosféricos	46
3.23. Diagrama de tuberías e instrumentation	47
3.24. Puntos de pérdida de carga en componentes a lo largo del sistema de tubería	48

3.25. Diagrama de bloques Matlab/Simulink	61
4.1. Llenado de tanque con válvula de drenado cerrada	64
4.2. Llenado de tanque con apertura de válvula de drenado al 50 %	64
4.3. Llenado de tanque con apertura de válvula de drenado al 100 %	65
4.4. Drenado de tanque con apertura de válvula al 100 %	66
4.5. Drenado de tanque con apertura de válvula al 50 %	67
4.6. Transferencia del tanque abierto a tanque cerrado con válvulas de transferencia al 100 %	67
4.7. Transferencia del tanque cerrado a tanque abierto mediante bomba de 1/2 HP	68
4.8. Transferencia del tanque abierto a tanque cerrado con caudal de suministro externo . .	69
4.9. Transferencia del tanque abierto a tanque cerrado con apertura de válvulas al 100 % .	69
4.10. Transferencia del tanque abierto a tanque cerrado con apertura de válvulas y suministro externo al 100 %	70
4.11. Transferencia entre tanques con válvulas de recirculación cerradas	71
A.1. Ensamble explosionado y tabla de componentes de válvula de corte Swagelok SS-65TS16 con actuador neumático	75
A.2. Ensamble explosionado y tabla de componentes de transductor 646 Fisher	76
A.3. Ensamble explosionado y tabla de componentes de sensor de presión diferencial moore	77
A.4. Ensamble explosionado y tabla de componentes de sensor de presión diferencial SMAR LD301	78
A.5. Ensamble explosionado y tabla de componentes de placa de orificio	79
A.6. Ensamble explosionado y tabla de componentes de válvula de control Orion serie 9000	80
A.7. Ensamble explosionado y tabla de componentes de sensor de nivel Warrick	81
A.8. Ensamble explosionado y tabla de componentes de rotámetro	82
A.9. Ensamble explosionado y tabla de componentes de tanque de techo abierto	83
B.1. Diagrama de bloques en Simulink - Planta Hidráulica completa	85
B.2. Diagrama de bloques en Simulink - Subsistema de tanque de techo abierto	86
B.3. Diagrama de bloques en Simulink - Subsistema de tanque de techo cerrado	86

Índice de tablas

3.1. Datos técnicos de válvula de control Orion serie 9000	30
3.2. Datos técnicos de válvula de corte Swagelok	34
3.3. Datos técnicos de válvula neumática MAC Series 900	35
3.4. Datos técnicos de transductor Fisher 646	40
3.5. Pérdidas de carga en componentes de conexión	49
3.6. Constantes de caracterización de bomba centrífuga de 1hp	54
3.7. Correspondencia de flujo en bifurcación secundaria	58
3.8. Correspondencia de flujo en tubería común	59
3.9. Factor de caudal dependiente	60

Acrónimos

DT Digital Twin. 1

IIoT Internet industrial de las cosas. 1, 4

PLM Ciclo de vida del producto. 1

NASA Administracion Nacional de Aeronautica y el Espacio. 2

IDC Consultora International Data Corporation. 2

IoT Internet de las cosas. 3, 7

MIT Instituto de Tecnología de Massachusetts. 3

OPC UA Incrustación y enlazado de objetos para control de procesos. 3

cobot Robot industrial colaborativo. 3

SCADA Supervisión, control y adquisición de datos. 3, 4, 10

PLC Controlador Logico Programable. 4, 10, 18, 30, 38, 39, 44

HMI Interfaz Humano-Máquina. 4

CAD Diseño Asistido por Computadora. 4, 5, 25

DTP Digital Twin Prototype. 8, 27, 29

DTI Digital twin Instance. 9

GDyT Dimensionamiento geométrico y tolerancias. 9

DTA Digital twin aggregate. 9

DTE Digital twin environment. 9

CC Corriente continua. 40

PID Controlador de acción proporcional-integral-derivativa (PID). 43, 44

HART Highway addressable remote transducer. 44

ISA International Society of Automation. 47

Capítulo 1

Introducción

El concepto gemelo digital o *Digital Twin (DT, por sus siglas en inglés)* es ampliamente reconocido como un revolucionario proceso de incorporación de tecnologías en todo tipo de industria, actualmente existe gran cantidad de elementos primordiales que se requieren para el desarrollo e implementación de un gemelo digital, un ejemplo es la conexión del gemelo virtual con el gemelo físico, que involucra tecnologías de adquisición de datos, transmisión de datos, control continuo, entre otras. Por lo que el uso de gran variedad de sensores y tecnologías de transmisión de datos son muy utilizados para recolectar información de las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto como lo son el diseño del producto, la manufactura, distribución y mantenimiento.

Gracias al modelado matemático para describir la dinámica de cualquier sistema, es posible generar predicciones más precisas del comportamiento relacionado con el proceso, enriquecer el respaldo de la toma de decisiones, generar futuros planes mejor informados y de esta manera desarrollar nuevas vías a través de una simulación digital que no desperdicia recursos valiosos.

1.1. Motivación

El crecimiento acelerado de la tecnología provoca que empresas con gran avance tecnológico potencien la reducción del tiempo de lanzamiento de productos nuevos y/o arriesgados, así como aumentar la flexibilidad de comercialización y con esto incrementar considerablemente su productividad. Dentro de este crecimiento acelerado de la tecnología se encuentra el gemelo digital el cual es una poderosa herramienta mediante la cual es posible mejorar la toma de decisiones basadas en datos por lo que su uso en la industria debe ser general y al alcance de todo personal calificado y así aumentar la confianza y el apego a dicha tecnología.

El *Internet industrial de las cosas (IIoT, por sus siglas en inglés)* es el conjunto de sensores, instrumentos y dispositivos autónomos conectados a través de internet a aplicaciones industriales, las cuales son ecosistemas tecnológicos que conectan dispositivos y a estos con las personas que gestionan los procesos, apoyándose de una representación virtual del comportamiento de un sistema complejo, con esto se logra aumentar de manera importante la seguridad y la eficiencia en los centros de producción gracias a que permite la operación simultánea, paralela y retroalimentada de los componentes del sistema o planta industrial con su representación virtual.

Los gemelos digitales generan un gran abanico de aplicaciones en todo tipo de industria, sin embargo, toda aplicación recae en representar alguna etapa del ciclo de vida del producto o *Product Lifecycle Management (PLM, por sus siglas en inglés)* que abarca desde el diseño del producto,

planificar su producción, realizar ingeniería, ejecutarla y brindar servicios posteriores. Con un gemelo digital es posible simular problemas o errores de producción y con ello accidentes, así como validar funcionamiento de software o programación de componentes, lo que permite ser más rápidos y eficientes. Así mismo se facilita la comprensión del funcionamiento de cada componente que conforma el sistema para favorecer la detección de mejoras en el proceso, lo cual es una gran ventaja ya que como operario o aprendiz se aprovecha como una forma de auto-capacitación constante.

Al desarrollar o implementar un gemelo digital se lleva a cabo gran cantidad de integración de nuevas tecnologías, dicha integración genera herramientas tecnológicas que en el ámbito académico se convierten en un ente de experimentación al ser utilizadas, analizadas, modificadas y perfeccionadas con la capacidad de probar modelos matemáticos en sistemas controlados capaces de volver a su estado inicial, de esta manera se comprueba el comportamiento del sistema en el gemelo virtual sin exponer la integridad del sistema físico.

1.2. Antecedentes

La idea del gemelo digital se a ido moldeando con el paso de los años, nociones de los inicios de la idea de gemelos digitales las podemos encontrar en películas de ciencia ficción de los años 60 en que la ciencia ficción superaba por mucho la realidad, sin embargo, con el crecimiento acelerado de la tecnología dicha ficción es cada vez más alcanzada. El gemelo digital como protagonista de la Revolución Industrial 4.0 es una de las herramientas tecnológicas que dejan de ser ficción para convertirse en una representación virtual de un sistema que brinda información de su comportamiento en tiempo real y al mismo tiempo mediante el análisis de datos puede comunicar averías futuras o puntos de mejora de procesos.

Los años 60 fue la década en que la *National Aeronautics and Space Administration (NASA, por sus siglas en inglés)* desarrolló una *Tecnología de la emulación* para simular sistemas utilizados en el espacio mediante complejas reproducciones físicas en tierra dando pauta a los primeros inicios del gemelo digital.

En el año 2002, el Dr. Michael Grieves de la Universidad de Michigan mencionó en una presentación a la industria junto a John Vickers, director de tecnología de la NASA, la posibilidad de la formación de un centro de gestión del ciclo de vida del producto que contara con una representación física y una virtual del elemento en cuestión. La presentación del Dr. Grieves era llamada *Concepto ideal de la gestión del ciclo de vida del producto*, sin embargo, contenía todos los elementos de un gemelo digital(espacio real, espacio virtual y flujo de datos entre los espacios en ambas direcciones), para ese entonces, el potencial computacional que exigía una herramienta tecnológica de este tipo era demasiado costoso para poder implementarse en la mayoría de los sectores industriales.

Posteriormente en 2006 el modelo conceptual del Dr. Grieves fue denominado en un artículo de revista como *Modelo de reflejo de información*, mientras el concepto se ampliaba en gran medida. Sin embargo, fue hasta 2011 donde el término *Digital Twin* fue agregado a este concepto por referencia a la forma en que el coautor describe este modelo. Para el año 2012, la NASA formalizó la definición de *Digital Twin* y vislumbró sus perspectivas en la industria aeroespacial. En 2018, la consultora Gartner situó a los *Digital Twin* como una de las diez tendencias tecnológicas de ese año, de igual forma la consultora *International Data Corporation (IDC, por sus siglas en inglés)* detectó mejoras del 30 por ciento de los procesos críticos de aquellas compañías que invirtieron en esta herramienta tecnológica.

El *Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés)* es un pilar en la construcción o implementación de un gemelo digital ya que interrelaciona dispositivos informáticos, máquinas mecánicas y digitales, objetos, animales, o personas que cuenten con identificadores únicos y la capacidad de transferir datos a través de una red sin necesidad de interacción humano-humano o humano-máquina. La idea de los dispositivos conectados ha existido desde la década de los años 70 bajo la influencia del internet y la computación generalizada, sin embargo, el término IoT fue mencionado por primera vez por el co-fundador del Auto-ID Center del *Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés)*, Kevin Ashton en una presentación que hizo para Procter and Gamble en 1999, posteriormente a esta fecha el IoT ha ido evolucionando a partir de la convergencia de tecnologías inalámbricas. Con ello favorecer que los datos no estructurados generados por máquinas sean analizados para obtener información e impulsar mejoras. Un ejemplo de los primeros dispositivos IoT fue una máquina dispensadora de refresco a mediados de los años 80, que mediante conexión a internet permitía conocer la existencia de cada tipo de refresco antes de ir hacia la máquina en busca de un refresco.

En 2020 se implementó un gemelo digital bi-direccional en la Universidad de Australia del Sur, donde establecieron una conexión *OLE for Process Control Unified Architecture (OPC UA, por sus siglas en inglés)* entre dos *Colaborative Industrial Robot (cobot, por sus siglas en inglés)* de diferentes marcas, la primer unidad fue un Cobot de 6 ejes y 6 grados de libertad, modelo UR5 de *Universal Robots*, la segunda unidad de igual forma fue un Cobot modelo AUBO-i5 de *AUBO Robotics* con las mismas características que la primer unidad. Se utilizaron dos computadoras, la primera con NX Siemens como plataforma de simulación CAD y sistema SCADA de automatización inductiva para adquirir datos en tiempo real sobre variables como posición, velocidad y temperatura de las juntas. La segunda computadora fue utilizada como la consola de control de movimiento ya que el programa sobre el cual se desarrollo dicho software(Phyton) requería una dirección IP separada para lograr la comunicación OPC UA. El propósito de dicha implementación fue comandar los dos cobots para finalizar alguna tarea de ensamblaje requerida. Como trabajo futuro se optimizará el control de movimiento y la configuración de la conexión OPC UA para reducir el tiempo de respuesta y mejorar la robustez([Protic, *et al.*, 2020]).

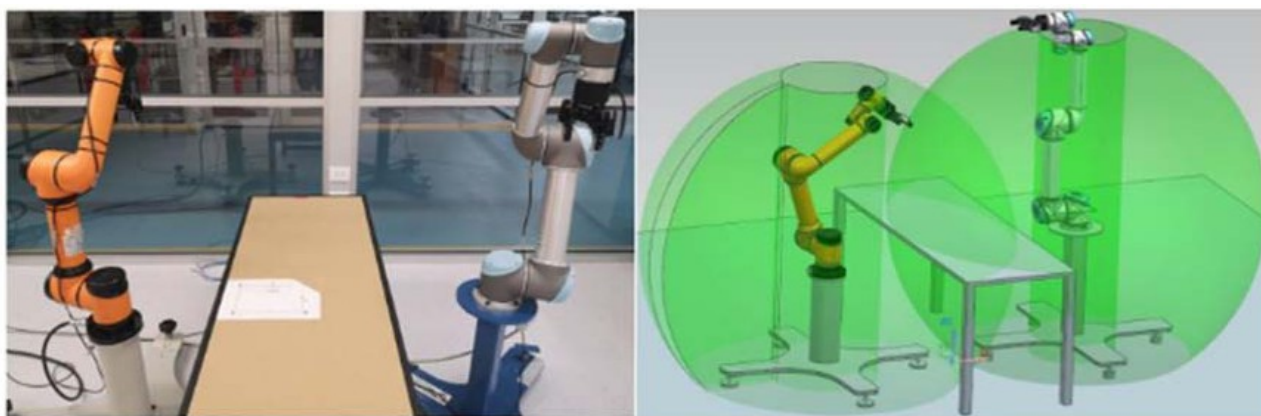


Figura 1.1 Implementación de gemelo digital bidireccional.
[Protic, *et al.*, 2020]

1.3. Formulación del problema

Con el surgimiento de la industria 4.0 alrededor del 2011, a nivel mundial la visión del uso de robots en la industria ha dejado de ser el propósito principal como solución a la búsqueda de mejor eficiencia, el menor uso de recursos, la mayor rapidez, la mejor maquinaria, la mejor calidad y en general la mejora de los procesos, que son el motor o el motivo del surgimiento de cada revolución industrial, debido a esto, en la actualidad las soluciones de hardware como robots, cintas transportadoras, entre otros pasan a segundo plano al evolucionar las soluciones basadas en software, interconectividad entre maquinaria, inteligencia artificial, autonomía, IIoT, entre otras. Esta nueva visión de la industria en México es parte de una estrategia a largo plazo que fomentará el desarrollo de un ecosistema de la industria 4.0 con instalaciones automatizadas para crear oportunidades de desarrollo y crecimiento orientado estratégicamente a una economía basada en el conocimiento.

La rápida adaptación de una empresa o institución a factores externos es crucial hoy en día ya que de esto depende su estabilidad económica como su grado de competencia ante las demás instituciones o empresas. Un ejemplo de factor externo que no se pudo prevenir con suficiente tiempo fue la llegada de la epidemia del SARS-COV2, sin embargo, existen demasiados factores externos muy diversos difíciles de predecir, que mediante la implementación de herramientas tecnológicas emergentes de la industria 4.0 la industria logrará ser más dinámica y adaptativa a estos.

Así como la industria evoluciona, también evoluciona la forma de generar conocimiento y transmitirlo, por lo que en el ámbito académico es indispensable contar con suficientes bancos de trabajo, material didáctico y demás equipo disponible para aprovechar y experimentar de forma más cercana posible con equipo industrial de vanguardia, de esta manera aumentar la velocidad de obtención del conocimiento por parte de los alumnos ya que debido al aumento de la población estudiantil, la experimentación de primera mano con equipo industrial es limitada.

En el laboratorio de automatización del departamento de control y robótica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM existe una planta hidráulica con dos tanques atmosféricos interconectados que integra componentes industriales de control de flujo de líquidos, los cuales son accionados mediante *Programmable Logic Controller (PLC, por sus siglas en inglés)*. Dicha planta es estudiada en la materia Control distribuido e integración SCADA para desarrollar rutinas de control secuencial y capacitar en el diseño de interfaces humano-maquina (*Human-Machine Interface (HMI, por sus siglas en inglés)*) por lo que es indispensable el estudio y comprensión del funcionamiento exacto de cada componente que conforma la planta hidráulica como válvulas de corte, válvulas de control, sensores de presión diferencial, medidores de nivel, placas de orificio, entre otros componentes para generar un buen control basado en el comportamiento y efectos o perturbaciones que cada elemento pudiera generar. Todo esto realizado de manera remota con la generación de un gemelo digital óptimo y realista.

1.4. Objetivos

El presente trabajo de tesis tiene como objetivos:

- Desarrollar el modelo tridimensional de toda la planta hidráulica con base en dibujos paramétricos mediante el uso de herramientas de diseño asistido por computadora (*Computer-Aided Design (CAD, por sus siglas en inglés)*).
- Proponer un modelo matemático que describa la dinámica del sistema de dos tanques interconectados mediante ecuaciones diferenciales.

- Implementar el gemelo digital del proceso de llenado, vaciado y transferencia de líquido entre tanques a través del modelo tridimensional desarrollado y el modelo matemático propuesto.
- Evaluar el modelo matemático con base en diferentes escenarios de llenado y vaciado de tanques y su comparación con la ejecución del escenario en la planta hidráulica física.

1.5. Contribuciones

- Se realizó un levantamiento de campo detallado apoyándose de fotografías, así como de instrumentos de medición como lo es el pie de rey y flexómetro, con ello se registraron dimensiones exteriores e interiores de cada elemento de la planta hidráulica para contar con las dimensiones necesarias para generar el modelo tridimensional del sistema. De igual forma se consultaron hojas de datos del fabricante de cada componente apoyándose de calcomanías o placas de especificaciones de cada componente y con esto generar fielmente el modelo tridimensional para lograr su copia exacta que servirá de apoyo para la capacitación de nuevos operarios así como guía para la obtención de dimensiones requeridas para generar las ecuaciones diferenciales del modelo matemático.
- Se presentó el modelo tridimensional de cada componente que conforma la planta hidráulica mediante el uso de la herramienta de diseño asistido por computadora CAD para modelado 2D y 3D, herramienta que permitió modelar cada pieza y conjuntos de piezas tridimensionales para después extraer planos técnicos de la construcción virtual de la planta, lograr gran énfasis al detalle del funcionamiento interno del sistema y así respetar las indicaciones que proporciona el fabricante a través de las hojas de especificaciones, además de proporcionar gran experiencia con el manejo de la representación 3D y visualización realista de todos sus elementos.
- Se generaron los subensambles y el ensamble completo de la planta hidráulica mediante el modo de ensamble, integrado que restringe los grados de libertad de los componentes del sistema para emular de manera realista los movimientos que desempeñan.
- Se propuso un modelo matemático que describe al sistema mediante ecuaciones diferenciales que considera las partes mecánicas e hidráulicas del sistema, el cual describe la velocidad del llenado y vaciado de cada tanque atmosférico en diferentes escenarios y por ende el comportamiento de los diferentes caudales en el sistema al variar la apertura de las diferentes válvulas.
- Se implementó el gemelo digital en *Matlab Simulink*, mediante las herramientas del entorno para la representación del modelo matemático.
- Se realizaron pruebas al modelo matemático a base de modificar la apertura de las diferentes válvulas y el encendido de las bombas centrífugas para así evaluar diferentes escenarios de vaciado y llenado de tanques.

1.6. Organización de la tesis

El presente trabajo de tesis se encuentra dividido en cinco capítulos. El capítulo presente concierne a la introducción, los siguientes cuatro se describen a continuación:

En el **Capítulo 2**, se presenta el marco teórico del gemelo digital, es decir, la definición del concepto, el aporte de valor y los niveles de madurez o sofisticación que puede alcanzar el gemelo digital de un sistema físico, además se abordan los conceptos básicos sobre hidráulica y diseño asistido por computadora, que nos permiten sentar la bases del desarrollo del modelo tridimensional del sistema hidráulico, también se presentan los conceptos básicos que se utilizarán para proponer un modelo matemático que describa la dinámica del sistema.

En el **Capítulo 3**, En el capítulo tres, se presenta la implementación del gemelo digital de la planta hidráulica dividido en dos partes, la primera parte es el desarrollo del modelo tridimensional para describir las partes, ensambles y sub-ensambles del sistema desarrollado y con ello dar especial detalle al funcionamiento interno de la válvula de control, la válvula de corte, el tanque de techo abierto y el tanque de techo cerrado, en la segunda parte se propone un modelo matemático para describir la dinámica del sistema mediante ecuaciones diferenciales.

Para validar el funcionamiento del modelo matemático, en el **Capítulo 4** se muestran los resultados de la emulación del modelo matemático ante diferentes escenarios de evaluación en *Matlab Simulink*, comparando valores y tiempos obtenidos de pruebas con el modelo físico.

Finalmente, en el **Capítulo 5** se establecen las conclusiones y el potencial trabajo futuro sobre este tema.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Industria 4.0

2.1.1. Definición

Industria 4.0 es una visión que evolucionó de una iniciativa para hacer que la industria manufacturera alemana sea más competitiva a un término adoptado a nivel mundial. Se ha definido como -un nombre para la tendencia actual de automatización e intercambio de datos en las tecnologías de fabricación, incluidos los sistemas ciberfísicos, el internet de las cosas, la computación en la nube, la computación cognitiva y la creación de fábricas inteligentes-.

La Industria 4.0 se compone de nueve pilares: big data, robots, simulación, fabricación aditiva, IoT, cloud computing, realidad aumentada, integración horizontal y vertical y ciberseguridad. En esencia, la Industria 4.0 incluye la transferencia(parcial) de autonomía y decisiones autónomas a sistemas y máquinas ciberfísicos, mediante el uso de sistemas de información.

Se caracteriza, entre otros, por:

- La integración o enfoque de tecnologías existentes adaptándolas al ambiente industrial.
- El puente entre el mundo físico y el digital a través de sistemas ciberfísicos, gracias a la evolución del IoT.
- Cambio de un sistema de control industrial central a uno donde los productos inteligentes definen los pasos de producción.
- Modelos de datos de circuito cerrado y sistemas de control.
- Mayor flexibilidad de producción de piezas complejas en relación a su forma, composición y detalle.

2.1.2. Retos de la industria actual

La industria mexicana de manufactura es uno de los principales estandartes de la economía nacional. De acuerdo con la Organización Mundial del Comercio(OMC), México es el 13° exportador de mercancías y el 12° importador de bienes a nivel mundial. El crecimiento de este sector se ve reflejado en el crecimiento del capital humano(crecimiento anual de personal del 2.8 por ciento, INEGI 2019) y una proyección a futuro con grandes expectativas.

Para poder disfrutar de los beneficios que la cuarta revolución industrial trae para la manufactura es importante conocer los retos que deben ser superados antes de empezar el proceso de transformación:

- Altas inversiones
- Elegir las tecnologías adecuadas: Establecer cuáles son requeridas para alcanzar los objetivos de negocio mediante esta transformación digital, así como definir cuáles son tecnologías viables, alcanzables y compatibles con los sistemas existentes para la implementación de la industria 4.0
- Capacitar al capital humano
- Crear un plan a futuro: Es esencial conocer los retos actuales y planes a futuro para implementar con éxito la transformación digital. Se deben definir prioridades, establecer rutas y construir un mapa de trabajo para saber perfectamente las condiciones actuales, a dónde se pretende llegar, así como conocer qué se necesita para lograrlo.

2.1.3. Gemelo Digital

Definición

El gemelo digital hace referencia a la reconstrucción de elementos completos y mapeo digital del estado de trabajo y el progreso del trabajo de la entidad física del producto en el espacio de información. Es una integración multifísica, multiescalable, superrealista, un modelo dinámico de simulación de probabilidades que puede ser utilizado para simular, diagnosticar, predecir y controlar el desarrollo de procesos de entidades físicas y de productos en entornos reales([Zhuang Cunbo, 2017]).

El gemelo digital es un conjunto de estructuras de información virtuales que describen de manera integral la producción potencial o productos manufacturados reales a partir del nivel micro-atómico al nivel macro-geométrico para productos complejos. El mejor resultado de construir un gemelo digital es que cualquier producto puede ser manufacturado realmente mediante inspección y la información obtenida del producto, también puede ser obtenida de su gemelo digital([Grieves M, 2017]).

El gemelo digital es una representación digital de un objeto o sistema físico conectada con el sistema real que representa. Busca tener una copia virtual de dicho elemento físico, a fin de monitorizar y analizar su reacción ante determinados estímulos o circunstancias, requiere de al menos cuatro elementos: modelo digital, datos vinculados e identificación y capacidades de monitoreo en tiempo real.

Tipos de manifestación de un gemelo digital

De acuerdo con [Grieves M, 2017] el gemelo digital se puede manifestar de 4 formas:

1. *Digital Twin Prototype (DTP, por sus siglas en inglés)*, este tipo de gemelo digital describe al prototipo de artefacto físico, contiene los conjuntos de información necesarios para describir y producir una versión física que duplique o empareje la versión virtual. Estos conjuntos de información incluyen el modelo 3D completamente anotado, lista de materiales, lista de procesos, inventario de servicios e inventario de desechos o componentes reemplazados.

2. *Digital twin Instance (DTI, por sus siglas en inglés)*, esta forma de gemelo digital describe un producto físico correspondiente a un gemelo digital que permanece vinculado a lo largo de la vida de ese producto físico. Este tipo de gemelo digital puede contener, pero nuevamente no se limita a, los siguientes conjuntos de información: Un modelo 3D completamente anotado con Dimensionamiento geométrico y tolerancias (GDyT) que describe la geometría de la instancia física y sus componentes, una lista de materiales que enumera los componentes así como una lista de procesos que enumera las operaciones que se realizaron en la creación de esta instancia física, junto con los resultados de cualquier medida y prueba en la instancia, un registro de servicios realizados y componentes reemplazados, así como estados operativos capturados a partir de datos de sensores reales, actuales, pasados y futuros previstos.
3. *Digital twin aggregate (DTA, por sus siglas en inglés)*, esta forma de gemelo digital es la agregación de todos los DTI. A diferencia del DTI, el DTA no puede poseer estructura de datos independientes. Puede ser una construcción informática que tenga acceso a todas las DTI y consulte de forma ad hoc o de forma proactiva. Sobre una base ad hoc, la construcción informática podría preguntar en cualquier momento el estado de los componentes con base en datos ya procesados. De forma proactiva, el DTA podría examinar continuamente las lecturas de los sensores y correlacionar esas lecturas del sensor con fallas para permitir desarrollar un pronóstico.
4. *Digital twin environment (DTE, por sus siglas en inglés)*, se trata de un entorno integrado multidominio de aplicación física para operar gemelos digitales para varios propósitos que se pueden segmentar en:
 - Predictivo, el gemelo digital se utilizaría para predecir el comportamiento futuro y rendimiento del producto físico. En la etapa de prototipo, la predicción sería del comportamiento del producto diseñado con componentes que varían entre sus tolerancias altas y bajas para asegurarse de que el diseño del producto cumplió con los requisitos propuestos. En la etapa de instancia, la predicción sería una instancia específica de un producto físico específico que incorporaba componentes reales e historial de componentes. El rendimiento predictivo sería basado en el estado actual del ciclo de vida del producto en adelante. Se pueden agregar varias instancias del producto para proporcionar un rango de posibles estados futuros.
 - Interrogativo, esto se aplicaría a los DTI como a la realización del DTA. Las instancias de gemelos digitales podrían ser interrogadas por las historias actuales y pasadas. Independientemente de dónde residiera su contraparte física en el mundo, las instancias del individuo podrían ser interrogadas por su estado actual del sistema: cantidad de combustible, ajustes del acelerador, ubicación geográfica, estrés de la estructura o cualquier otra característica que haya sido instrumentada. Varias instancias de productos proporcionan datos que se correlacionan para predecir estados futuros. Por ejemplo, correlacionar las lecturas de los sensores de componentes con fallas posteriores de ese componente daría como resultado una alerta de posible falla del componente gracias a que se informó ese patrón de actividad del sensor.

Puesta en marcha virtual del gemelo digital

La puesta en marcha virtual permite al programador probar la lógica de control antes de que el hardware real esté disponible y da como resultado una reducción del tiempo de implementación. Además, la disponibilidad de un modelo virtual o la puesta en marcha virtual facilita la mejora de la calidad, la monitorización del estado, la formación virtual y la reducción del tiempo de puesta en marcha.

La falta de integración con otras herramientas y la uniformidad en los formatos de archivo es un tema importante que limita el uso de la puesta en marcha virtual, debido a un alto esfuerzo y conocimiento profundo para la construcción del modelo digital.

La puesta en marcha virtual permite la verificación de un sistema de fabricación mediante la realización de una emulación que implica una planta virtual y un controlador real (hardware in the loop) o una planta virtual con un controlador simulado (software in the loop). El aspecto fundamental de la puesta en marcha virtual es la digitalización de todos los dispositivos de la planta para que el modelo virtual funcione exactamente como el real.

De acuerdo con [Lee y Park, 2014], las configuraciones para implementar la puesta en marcha virtual pueden distinguirse en:

- Software in the loop and Model in the loop: se conecta una representación digital de los componentes a un PLC emulado. Esto tiene la ventaja de que no se necesita hardware industrial y posteriormente los altos costos no son necesarios para esta configuración. Además, este método es rápido de implementar.
- Hardware in the loop: Involucra una planta virtual y un controlador real. Al usar una configuración idéntica a la planta real tiene la ventaja de probar en elementos o hardware de verdad. Esto da como resultado la posibilidad de verificar el tiempo de ciclo y el uso de la memoria. La transformación de la lógica de control no es necesaria. La desventaja es la necesidad de equipos industriales.

Actualmente, en la industria se utilizan diferentes enfoques para la puesta en marcha virtual:

- Puesta en marcha virtual manual: Un ingeniero emula el sistema real mediante la manipulación de entradas a través de un simulador de PLC o una herramienta de Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA, por sus siglas en inglés). Al monitorear el efecto resultante en las salidas, la lógica de control puede ser verificada. Dado que estos procedimientos se configuran y/o realizan manualmente, la disponibilidad, corrección e integridad de los escenarios de prueba dependen en gran medida de la comprensión de los programadores del equipo real y su experiencia en la puesta en marcha. El esfuerzo de modelado para este enfoque es bajo.
- Puesta en marcha virtual basada en modelos: El código del programa está escrito para emular el comportamiento del sistema real. El código manipula las entradas del proceso de acuerdo con el estado de las salidas. Las propiedades físicas no se tienen en cuenta. Este enfoque no proporciona una retroalimentación visual para el programador. La exactitud e integridad de las pruebas depende de la disponibilidad y el nivel de detalle de la emulación del código. El código de emulación se puede ejecutar en el mismo PLC que la lógica de control real, así como en otro PLC conectado o en la computadora. El código puede ser almacenado en una biblioteca para su reutilización en proyectos posteriores.

- Puesta en marcha virtual de gemelos virtuales(VTVC): La geometría CAD se amplía con cinemática, funcionalidad y propiedades eléctricas. Las características típicas son opciones de interfaz con controladores industriales reales, incorporación de conocimientos de física y dinámica alrededor de un motor de física y visualización en 3D. Una vez que se completa un componente y se verifica que el comportamiento es comparable a su físico gemelo, se puede almacenar en una biblioteca para su reutilización. Cuando todos los componentes están terminados y su funcionamiento es verificado, el usuario ya no necesita conocer los detalles de funcionamiento de todo el sistema. La inspección visual del funcionamiento correcto de la lógica de control es posible.

2.2. Hidráulica

La hidráulica es la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en función de sus propiedades mecánicas, se conoce como una tecnología que emplea un líquido o fluido como medio de transmisión de la energía necesaria para mover o hacer funcionar una máquina o un mecanismo. Generalmente el fluido utilizado puede ser agua o aceite, sin embargo, en el ámbito industrial se emplea el término hidráulica para referirnos a aquello que tiene que ver con la mecánica de fluidos.

Los fluidos hidráulicos son comúnmente utilizados para transferencia de potencia mecánica y lubricación, sin embargo, existen diferentes tipos de fluidos para diferentes requerimientos y tipos de trabajos, por ello es importante conocer las propiedades de los fluidos hidráulicos que son esenciales para determinar el uso de cierto fluido y que les permiten realizar las funciones fundamentales y cumplir con requerimientos de calidad. Entre dichas propiedades se encuentran la viscosidad, punto de fluidez, compresibilidad, poder antiespumante, resistencia al envejecimiento, punto de congelación, punto de inflamación o combustión, entre otras.



Figura 2.1 Elementos de un sistema hidráulico

Son tres las principales partes en las que se divide un sistema hidráulico: El sistema de bombeo, el sistema de control de flujo o presión y actuadores en caso de existir. El sistema de bombeo transfiere la potencia a través del fluido al actuador para generar trabajo. La regulación de esta transmisión de potencia se realiza en el sistema de mando que está formado por una serie de válvulas limitadoras de caudal y de presión, distribuidoras, de bloqueo, etc.

En la Figura 2.1 se observa a grandes rasgos cada elemento que conforma el sistema hidráulico. El tanque de almacenamiento de fluido en este caso es un tanque atmosférico cilíndrico dotado de tubería de llenado y tubería de vaciado para lograr un control estable y esperado del nivel del líquido en su interior. Enseguida se encuentra el sistema de bombeo conformado por una bomba centrífuga que se encarga de proporcionar flujo y presión de líquido para ser transportado hacia donde se requiera por medio de tubería de transporte y válvulas de control y/o de corte para controlar dicho flujo o caudal dentro de la tubería y así lograr un buen control de transferencia de líquido.

2.3. Elementos de regulación de presión y flujo

Uno de los elementos de uso más amplio y generalizado en transporte y redes de abastecimiento son las válvulas automáticas de control hidráulico. Dichas válvulas son elementos que mandan o regulan la puesta en marcha, el paro y la dirección, así como la presión o el caudal en los diferentes puntos de la red y con ellas se realizan funciones de maniobra, regulación, control y protección. Según su función las válvulas pueden dividirse en: válvulas distribuidoras, válvulas de bloqueo, válvulas de presión, válvulas de caudal y válvulas de cierre.

2.3.1. Válvulas de control

Las válvulas de control hidráulico o de regulación se utilizan para controlar y regular distintos parámetros de operación en medios de transporte de fluidos. Las válvulas de control hidráulico operan en general de forma autónoma, aunque también pueden ser comandadas a distancia según su tipo de accionamiento (manual, mecánico, neumático, pilotado o eléctrico) y así modular, abrir o cerrar.

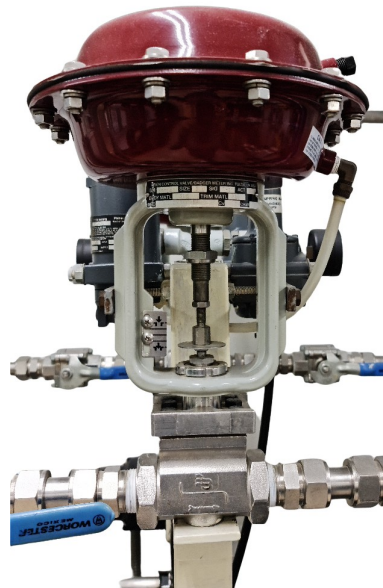


Figura 2.2 Válvula de control Series 9000

En la Figura 2.2 se observa una válvula de control de accionamiento neumático de diafragma. Ésta se compone de un vástago central aislado mediante ligas u O-rings que permiten su movimiento vertical y que tiene adherido en un extremo una cabeza de mayor diámetro, la cual sella sobre un

asiento del cuerpo de la válvula y bloquea el paso del fluido de manera gradual con base en la distancia entre el asiento y la cabeza del vástago, para así regular el caudal gracias a su diseño.

Para seleccionar este tipo de válvulas el fabricante indica el coeficiente de caudal K_{vs} con un grado de apertura del 100 % de la válvula. Este coeficiente de caudal indica el caudal máximo posible de un fluido a través de la válvula. Con aberturas de la válvula inferiores al 100 %, el coeficiente de caudal se denomina K_v y se encuentra entre 0 y K_{vs} .

$$K_v = Q * \sqrt{\frac{1bar}{\Delta p}}$$

2.3.2. Válvulas de corte

Las válvulas de corte o válvulas de paso se utilizan en sistemas hidráulicos para aislar y bloquear componentes o parte del circuito para cortar el suministro del fluido mediante el cierre rápido. Para abrir o cerrar dicha válvula debe estar despresurizado el circuito hidráulico en cuestión. En específico la válvula de bola se conoce como válvula de corte rápido de 90°, su apertura es total para un flujo sin restricciones en la posición abierta.

Generalmente se utilizan con fluidos como el agua, aceite, alimentos líquidos, bebidas, carburantes o vapor. Su construcción es totalmente de acero inoxidable con cuerpo y bola forjados. Cabe señalar que la seguridad es el criterio principal de la construcción de este tipo de válvulas ya que supera cualquier exigencia tecnológica, técnica y especificaciones económicas en importancia. De acuerdo con [Alexandrov, *et al.*, 2021], la seguridad es un criterio básico si hablamos de cualquier tipo de válvulas de aislamiento y se define como una propiedad de las barras de acero, que les permite mantener sus propiedades dentro de sus especificaciones en el transcurso del tiempo y puede ser observada como un complejo parámetro, influenciado por los siguientes factores:

- Impermeabilidad. Es la propiedad de las juntas que permite proporcionar el nivel necesario de fuga, lo que permite que la construcción pueda funcionar de acuerdo con los valores preestablecidos para realizar el trabajo más eficiente y proporcionar seguridad para las personas y el medio ambiente.
- Durabilidad. Es la propiedad de los materiales y elementos de soportar cierto nivel de cargas sin sufrir daños y destrucción. Al mismo tiempo, la durabilidad y la impermeabilidad forman un parámetro consolidado - la fiabilidad.
- Período de resistencia. La resistencia es la propiedad de mantener la confiabilidad dentro de cierto período de tiempo para proporcionar buen funcionamiento del sistema.

En la Figura 3.6 se observa una válvula de corte con accionamiento neumático. Este accionamiento requiere de suministro de presión de aire para mover un pistón dentro de la carcasa de color negro acoplado a un resorte que se encarga de regresar dicho pistón a su posición original cuando se libera la presión de aire suministrada, con esto se logra mover una cremallera acoplada en el otro extremo del cilindro que a su vez esta conectada a un piñón que mueve el eje de la válvula de globo, lo que permite efectuar 90 grados de giro en su recorrido y con esto abrir o cerrar la válvula.

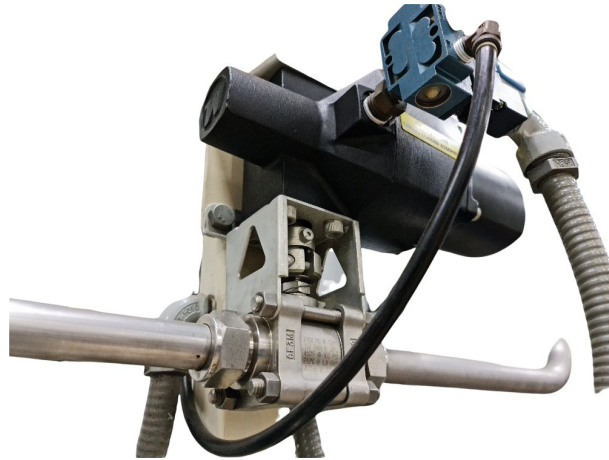


Figura 2.3 Válvula de corte Swagelok SS-65TS16

2.4. Dispositivos de medición de velocidad y flujo

Un medidor de velocidad o flujo es aquel dispositivo que se conecta en las líneas por donde pasa un fluido para obtener velocidad o caudal del fluido que se encuentra en movimiento. Los factores para la elección del tipo de medidor de fluido son:

- Rango. Se debe tomar en cuenta la precisión que se requiere ya que existen dispositivos que pueden medir desde ml/seg hasta m^3/seg . Para esto debe conocerse también el orden de magnitud general de la velocidad de flujo así como el rango de las variaciones esperadas.
- Exactitud requerida. Cualquier dispositivo de medición puede proporcionar una exactitud dentro del 5 % del flujo real, aunque también existen medidores que proporcionan desde 2 % hasta 0.5 % de exactitud, sin embargo, entre más exacto sea el medidor, más costoso será este.
- Pérdida de presión. Debido a los detalles de construcción del dispositivo de medición, estos pueden causar una pérdida de energía ya que llevan a cabo la medición mediante una restricción o un dispositivo mecánico en la corriente de flujo.
- Tipo de fluido. El funcionamiento de algunos medidores de fluido se encuentra afectado por las propiedades y condiciones del fluido ya que el fluido puede ser un líquido o un gas. Otros factores que pueden ser importantes son la viscosidad, la temperatura, la corrosión, la conductividad eléctrica, las propiedades de lubricación y homogeneidad.
- Calibración. En el caso del tipo más básico de los medidores, se han determinado formas geométricas y dimensiones estándar para las que se encuentran datos empíricos disponibles. Estos datos relacionan el flujo con una variable fácil de medición, tal como una diferencia de presión o un nivel de fluido.

Existen diferentes tipos de medidores de flujo que serán valorados para ser instalados de acuerdo a sus características y capacidades para medir el flujo del fluido en cuestión, entre los que se encuentran:

- Medidores de cabeza variable
 - Tubo de venturi

- Placa de orificio
- Boquilla o tobera de flujo
- Medidores de area variable
 - Rotámetro
 - Fluxometro de turbina
 - Fluxometro de vortice
 - Fluxometro de velocidad(Tubo pitot)
 - Fluxometro electromagnético
 - Fluxometro de ultrasonido



Figura 2.4 Rotámetro Fischer&Porter

2.4.1. Placa de orificio

Debido a su estructura simple, larga vida útil y datos de medición confiables, la placa de orificio se aplica ampliamente en la industria de la ingeniería para medir el caudal de fluidos como gas

natural, vapor, agua, etc. Son dispositivos que consisten en una reducción de la sección de flujo de una tubería, de modo que se produzca una caída de presión, a consecuencia del aumento de velocidad. En [Li, *et al.*, 2010] se menciona que en el diseño y aplicación de la placa de orificio, lo más importante es confirmar el coeficiente de descarga(C_o), que suele estar influido por la relación de apertura β , la rugosidad del tubo y la viscosidad del fluido, etc. El valor real del coeficiente de descarga(C_o) depende de la ubicación de las ramificaciones de presión y también es alterado por las variaciones en la geometría de la orilla del orificio. El valor del coeficiente de descarga(C_o) es mucho más bajo que el del tubo Venturi o la boquilla de flujo debido a que el fluido se fuerza a realizar una contracción repentina seguida de una expansión repentina.

Existen tres tipos de placa de orificio y su uso dependerá del tipo de fluido del que se requiera medir su caudal:

- Placa concéntrica. Este tipo de placa es muy utilizada cuando el fluido en cuestión es un líquido, de acuerdo a la geometría del orificio, se encuentra la placa de arista viva (versión estándar) muy utilizada para aplicaciones universales en gases y líquidos limpios. También se encuentran las placas de cuarto de círculo y cónicas, siendo estas la mejor elección para la medición de fluidos con bajo número de Reynolds.
- Placa excéntrica. Este tipo de placa es utilizada para medición en medios de dos fases sucios y que contienen partículas. Sin embargo, en diámetros de tubo reducidos la placa excéntrica constituye la mejor solución en comparación con la placa segmentada.
- Placa segmentada. Este tipo de placa se utiliza para medir fluidos en medios bifásicos, sucios y medios que contienen partículas. El orificio que presentan estas válvulas no es un orificio circular ya que es un orificio segmentado que forma un semicírculo.



Figura 2.5 Placa de orificio

En la Figura 3.9 se observa una placa de orificio del tipo concéntrica ensamblada. En sus dos bridas de unión se pueden observar dos tornillos tapón de los extremos del punto de toma de presión. Cada brida cuenta por defecto con dos roscas $\frac{1}{2}$ NPT (un punto de toma de presión está obturado con un tapón en cada brida).

En [WIKA, 2019] se describe en el apartado 4 de la norma ISO 5167-2 (2003), el cálculo del caudal se basa en que la presencia de una placa de orificio, en el interior de una tubería por la que circula un

fluido, origina una diferencia de presión estática entre los dos lados de la placa. Dicho caudal másico del fluido se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} * \frac{\pi}{4} * d^2 * \sqrt{2\Delta P\rho}$$

Donde:

- C, Coeficiente de descarga adimensional
- β , Relación de diámetros ($\frac{d}{D}$)
- ΔP , Diferencia de presión entre ambos lados de la placa de orificio
- ρ , Densidad del fluido

Para que los resultados obtenidos mediante este procedimiento de cálculo se puedan considerar válidos, hay que tener en cuenta lo indicado en la norma ISO 5167:

- $d \geq 12.5mm$
- $0.10 \leq \beta \leq 0.75$
- $Re \geq 5000$

2.4.2. Sensores de presión diferencial

Un sensor de presión convierte valores de presión en señales eléctricas. La mayor parte de los sensores de presión miden la deformación de una membrana según la diferencia de presión aplicada en ambos lados de esta. Mientras que los términos sensor de presión y transductor de presión pueden considerarse sinónimos, el término transmisor de presión se refiere a un sensor de presión equipado con electrónica de medición que le permite emitir una señal de salida estandarizada. En este caso la presión a la que se encuentra sometido el sensor es una presión hidrostática, la cual se conoce como la presión que un fluido ejerce sobre un cuerpo debido a la columna de dicho fluido sobre el cuerpo en cuestión, en este caso el sensor de presión.

Se consideran 3 tipos de presión referencial y, por lo tanto, 3 tipos de sensores:

- Presión absoluta: en un sensor de presión absoluta, el segundo lado de la membrana está sometido al vacío. Su deformación corresponde exactamente a la presión medida.
- Presión relativa: en un sensor de presión relativa, el segundo lado de la membrana está sometido a la presión atmosférica. Su deformación equivale a la diferencia entre la presión medida y la presión ambiente.
- Presión diferencial: un sensor de presión diferencial tiene 2 entradas, una para cada lado de la membrana. Su deformación es igual a la diferencia de presión entre las 2 entradas.

Por otro lado en cuanto a los transmisores de presión, existen diferentes variantes que dependen del tipo y de sus características tanto físicas como de composición del sensor o transmisor. En un sensor de presión piezorresistivo, la presión ejerce una fuerza sobre un elemento del sensor que provoca un cambio en su resistencia. Los sensores de presión piezorresistivos tienen una alta sensibilidad, son robustos y ofrecen una buena resistencia térmica, sin embargo, su señal de salida es débil.

En un sensor de presión piezoeléctrico, la presión ejerce una fuerza sobre un elemento fabricado con material piezoeléctrico, con lo que se crea una tensión a través del elemento. Estos sensores pueden tener un rango de medición muy amplio y una resistencia térmica muy buena. Sin embargo, su señal de salida es débil y son menos precisos que los sensores piezorresistivos.

En un sensor de presión capacitivo, la membrana es una de las placas de un condensador. Bajo el efecto de la presión, la membrana se deforma, por lo que varía la capacitancia del condensador. Estos sensores ofrecen buena precisión y una alta sensibilidad y pueden medir bajas presiones, de hasta un mbar. Sin embargo, sus mediciones pueden ser inestables debido a las vibraciones en el sistema.

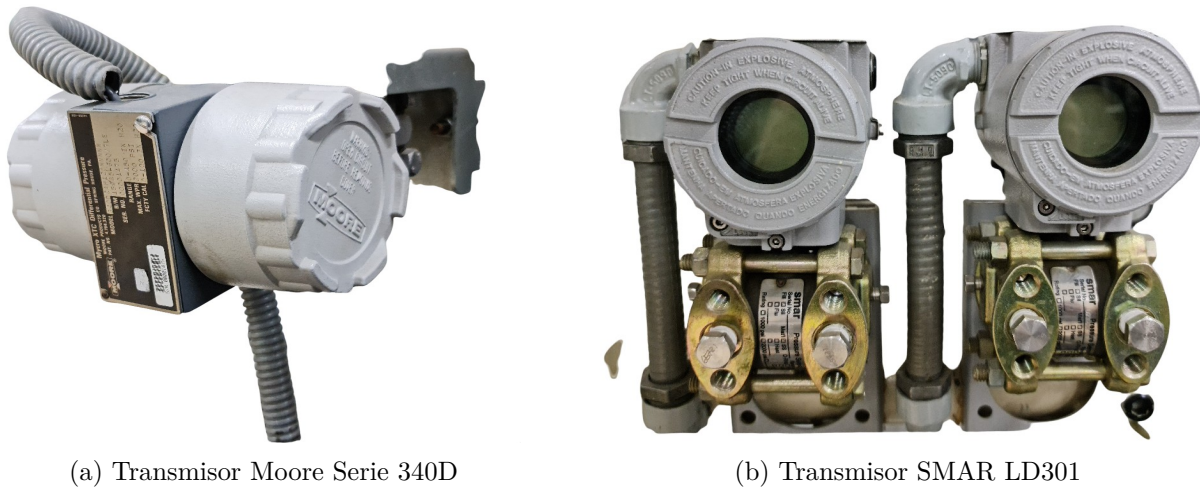


Figura 2.6 Transmisores de presión diferencial

En la Figura 2.6 se observan dos ejemplos de transmisores de presión diferencial, utilizados ampliamente en la industria ya que gracias a su gran precisión y exactitud son de gran ayuda para lograr un buen control con base en la señal eléctrica que estos comuniquen a la central de control, en este caso al PLC.

2.5. Tanques atmosféricos

Los tanques atmosféricos son recipientes que se utilizan para almacenar líquidos en grandes cantidades dentro o fuera de almacenes o industrias. Se conoce como a todo aquel tanque ya sea horizontal o vertical, enterrado o en superficie, abierto o cerrado de diferentes tamaños y capacidades donde la presión interna siempre es la misma que la presión atmosférica del lugar en donde se encuentran, son las cantidades las que llevan a que tengan determinadas formas, ya que de la forma

depende de cuánto líquido se guarde. La forma indicada para un tanque atmosférico es la esférica, sin embargo, por problemas de capacidad, la que más se utiliza es la cilíndrica con extremos hemisféricos.

A modo de referencia y de acuerdo con [RUIZ, 2016], PEMEX en su normatividad de referencia correspondiente marca 13.79kPa(2 lb/in²), así como el estandar API 650 marca como presión limite interna 17.2 kPa(2.5 lb/in²). Debido a esto ultimo, por lo general el sistema de ventilación de este tipo de tanque de almacenamiento es directo a la atmósfera.

2.5.1. Tipos de tanques atmosféricos

Existen dos tipos de tanques de almacenamiento: los tanques atmosféricos y los tanques presurizados. Los tanques atmosféricos son una especie de contenedor para almacenar productos, especialmente líquidos, que deban permanecer a la misma presión que la de la atmósfera en donde se encuentre ubicado el tanque. Existen distintos tipos de tanque atmosférico que dependen de la aplicación que estos tengan:

- Tanques sin techo. Los tanques atmosféricos sin techo representan un ahorro financiero, se emplean para servicios hidráulicos que incluyen el almacenaje de agua contra incendios, agua de servicio y de refrigeración.
- Tanques de techo fijo. Son tanques totalmente soldados, aunque existen remachados o abulonados que se ocupan especialmente para materiales no volátiles o no inflamables y que presentan baja presión de vapor como son el agua , diesel, asfalto, petróleo crudo, etc. Se pueden proveer con accesorios, tales como mezcladoras, calentadores, plataformas, escaleras, caudalímetros, medidores de temperatura y una variedad de conexiones.
- Tanques de techo flotante. Estos tanques se utilizan para materiales de mayor presión de vapor, pues tienden a reducir pérdidas por evaporación como la concentración de mezclas explosivas. Sin embargo, es fundamental que la presión de vapor no iguale jamás la presión atmosférica. Como su nombre lo indica, tienen un techo que flota y que se mueve sobre la superficie del hidrocarburo, ya sea para arriba o para abajo, según el nivel del hidrocarburo dentro del tanque y son llamados por el estándar API 650 Techos Externos Flotantes. A diferencia de las sábanas flotantes, los techos flotantes solamente son permitidos hacerlos en acero al carbono. Ante la aparición en el mercado de las sábanas flotantes, estos techos se emplean cada vez en menor medida, debido a que su construcción es cara y además requieren de mantenimiento.
- Tanques de techo abovedado. Son tanques que pueden contener presiones de vapor superiores al nivel de la atmosférica, pero no tan altas, que requieran el almacenamiento en tanques esféricos o de bala. Este tipo de techos se aplican en grandes tanques de almacenamiento de alta capacidad de carga(desde 5000 m³, pero no más de 50 m de diámetro). Este es un techo esférico fijo con un tipo de sistema de marco radial-circular.
- Tanques de techo flotante interno o de sábana flotante. La sábana flotante en su interior, la cual es una membrana con pequeños compartimientos para poder flotar llamados pontones. Esta sábana flotante es por lo general de acero al carbono, acero inoxidable o aluminio, esta sábana se encuentra en contacto directo con la superficie del hidrocarburo flotando sobre el mismo para evitar su evaporación y por lo tanto evitar mermas de producto y contaminación del medio ambiente. Estas sábanas flotantes, llamadas de acuerdo al estándar API 650 Techos Internos

Flotantes, son también muy usadas en los tanques de techo cónico fijo, sin embargo, su uso depende del producto que se vaya a almacenar y la temperatura ambiental de la zona. Por ejemplo, para las gasolinas se coloca hoy en día una sábana en cualquier tipo de tanque.



(a) Tanque atmosférico sin techo

(b) Tanque atmosférico de techo fijo

Figura 2.7 Tipos de tanques atmosféricos

Características de un tanque atmosférico

Para estar al tanto de la fabricación de un tanque nuevo y las características que debe poseer para ser considerado como tanque atmosférico existen varias normatividades que establecen los requisitos mínimos de materiales, diseño, fabricación, montaje e inspección de tanques verticales, cilíndricos, enterrados, cerrados, descubiertos en diferentes dimensiones y capacidades mientras que su presión interna se aproxime a la atmosférica, con la parte inferior apoyada uniformemente y que no sean refrigerados ni excedan una temperatura máxima de diseño de 93°C (199°F). Entre dichas normatividades y entre otras se encuentran:

- Estandar API 620. Diseño y construcción de tanques de almacenamiento grandes, soldados y de baja presión.
- Estándar API 650. Diseño, montaje, y construcción de tanques soldados de acero.
- Estándar ASME SEC. VIII DIV. 1 Rules for Construction of PressureVessels.

- NRF-PEMEX-113-2007. Diseño de tanques atmosféricos.
- NRF-PEMEX-028-2010. Diseño y Construcción de Recipientes a Presión.

2.5.2. Elementos que conforman un tanque atmosférico

En los sistemas neumáticos se utilizan las válvulas para regular y controlar la dirección, el flujo o caudal del aire, en este caso se utilizan válvulas con la misma finalidad para el fluido que se este almacenando. De acuerdo con el tipo de tanque atmosférico y los accesorios con los que cuente, el número de elementos y la complejidad de estos será diferente, sin embargo, para la mayoría de tanques los elementos básicos son los mismos:

- Salidas de gas en la parte superior
- Válvulas de contrapresión
- Entrada de la emulsión
- Línea de desbordamiento hacia el tanque de eliminación de fluido
- Salida lateral
- Desagüe

2.5.3. Medidores de nivel

La importancia de la medición de nivel no puede ser subestimada. Mediciones incorrectas o inapropiadas pueden causar que los niveles en los tanques de almacenamiento industriales sean excesivamente superiores o inferiores a los valores medidos. Los niveles bajos pueden causar problemas de bombeo y dañar la bomba, mientras que los niveles altos pueden causar que los recipientes se desborden y creen problemas potenciales de seguridad y ambientales.

Existen dos métodos de realizar lecturas en un líquido, el método directo y el indirecto, lo que dependerá del tipo de líquido en cuestión así como sus propiedades físicas como químicas.

Métodos directos:

- Medidores de sonda o de vara
- Medidores de nivel de cristal
- Medidores de nivel de flotador

Métodos indirectos:

- Medición de nivel por presión hidrostática o presión diferencial
- Medición de nivel por presión hidrostática en tanques abiertos:
 - Medidor manométrico
 - Medidor de membrana
 - Medidores de nivel por burbujeo

- Medidores de nivel por desplazamiento
- Medidores de nivel según las propiedades eléctricas del producto a medir:
 - Medidor de nivel capacitivo
 - Medidor de nivel ultrasónico
 - Medidor de nivel por radiación
 - Medidor de nivel de tipo radar



Figura 2.8 Sensor de nivel de conductividad Warrick controls 3E2C
[Gems, 2015]

2.6. Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos se define grosamente como la rama de la mecánica que estudia el movimiento de los fluidos, es de gran importancia para la ingeniería ya que nos ayuda a entender y describir el movimiento de fluidos a través de diferentes medios de propagación de su movimiento, ya sean tuberías, canales, presas, pistones, cilindros, válvulas, entre muchos otros medios.

El estudio de la mecánica de fluidos considera dos tipos de fluidos:

- Fluido en estado de reposo: Son aquellos que ejercen una fuerza sobre las paredes de los recipientes que los contienen y sobre cualquier objeto que se encuentre sumergido en ellos. Esta fuerza es conocida como presión hidrostática.
- Fluido en movimiento: Son fluidos que no se encuentran estáticos, un ejemplo de ello son las corrientes de aire, el agua en un río, etc. El estudio de líquidos en movimiento se conoce como hidrodinámica, mientras que el estudio de los gases en movimiento se conoce como aerodinámica.

2.6.1. Ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía para volúmenes de control

El principio de continuidad en mecánica de fluidos se refiere al comportamiento de acumulación en cierto volumen definido por lo que fluye hacia dicho volumen en un tiempo definido, menos lo que fluye hacia afuera de ese volumen en ese tiempo. Si el signo obtenido es negativo, significa que el fluido en ese volumen se está agotando. El principio es consecuencia de la ley de conservación de la masa. Con ayuda de esta ecuación, más la segunda ley de Newton y conservación de la energía se puede describir completamente el comportamiento de los fluidos. Se requiere del uso y comprensión del caudal másico que es la cantidad de masa de una sustancia que atraviesa una determinada sección en un segundo a partir de la densidad del fluido(ρ), velocidad del fluido(V) y el área de la sección transversal de la tubería(A):

$$Q = \rho * V * A(\text{Kg}/\text{seg})$$

y caudal volumétrico que es la cantidad de volumen de una sustancia que atraviesa una determinada sección en un segundo a partir de la velocidad del fluido(V) y el área de la sección transversal de la tubería(A):

$$Q = V * A(\text{m}^3/\text{seg})$$

2.7. Flujo en tuberías

Los sistemas de tuberías son generalmente utilizados para el transporte de fluidos. Cuando el fluido pasa por el interior de la tubería, la energía de presión del fluido disminuye debido a la fricción y la energía interna del fluido aumenta. Las pérdidas que se producen al pasar fluido por tuberías se le atribuyen a la fricción interna en el fluido y la fricción entre el fluido y la pared debido a que siempre se presenta rugosidad en las paredes de la tubería que va a depender del material del que está hecha.

Existen dos tipos de flujo dentro de las tuberías que va a depender del número de Reynolds(Re) que dicha tubería obtenga. Para un flujo laminar, el número de Reynolds será menor a 2300 y para un flujo turbulento el número de Reynolds será mayor o igual a 2300. El número de Reynolds se puede calcular a partir del diámetro interno de la tubería(d), la velocidad media del fluido(V) y la viscosidad cinemática($\nu \text{m}^2/\text{seg}$).

$$Re = \frac{V * d}{\nu}$$

El flujo laminar se caracteriza por el movimiento paralelo de las partículas del fluido sin mezclarse entre sí. La distribución de la velocidad del fluido es desigual del centro a las paredes del tubo, en la zona cercana a las paredes el fluido es frenado como consecuencia de la fricción y se mueve más lento que en el centro de la tubería.

El flujo turbulento se caracteriza por movimientos impredecibles y no estacionarios de las partículas fluidas, las cuales se arremolinan e intercambian energía. La distribución de la velocidad es casi constante

en un amplio rango de la sección transversal de la tubería y la pérdida de carga es proporcional al cuadrado de la velocidad media del fluido.

La diferencia de presión(Δp) de la entrada a la salida de un elemento recto de tuberías se obtiene del factor de fricción de tubería(λ), la longitud de la tubería(L), la densidad del fluido(ρ) y el cuadrado de la velocidad media del fluido(v) dividido por el diámetro interior de la tubería(d_i).

$$\Delta p = \frac{\lambda * L * \rho * v^2}{d_i * 2}$$

2.8. Manometría y viscosimetría

La manometría es la ciencia que estudia la medición de la presión en los fluidos. La presión es la fuerza que ejerce un fluido por unidad de área, ésta solo se emplea cuando se trata de un gas o un líquido. La presión en un fluido aumenta con la profundidad como resultado del peso del fluido. En procesos industriales existen varias aplicaciones de medición de presión, entre estas aplicaciones se encuentran:

- Calidad del producto, la cual frecuentemente depende de ciertas presiones que se deben mantener en un proceso.
- Por seguridad, como por ejemplo, en recipientes presurizados donde la presión no debe exceder un valor máximo dado por las especificaciones de diseño.
- En aplicaciones de medición de nivel.
- En aplicaciones de medición de flujo, donde la diferencial de presión a través de una restricción es proporcional al cuadrado del flujo.

En el sistema internacional la unidad para expresar la presión es el Pascal(Pa) y equivale a Newton sobre metro cuadrado. Al mismo tiempo, la presión suele medirse en atmósferas(atm), estas se definen como 101.325 Pa, y equivale a 760 mm de mercurio o 14,70 *lbf/pulg²*(psi). Aunque físicamente se aplica una fuerza por unidad de área, se reserva el término “esfuerzo” para la mecánica de sólidos y se utiliza el término “presión” para la mecánica de fluidos. De esta manera se puede definir a la presión como:

$$P = \frac{F}{A} \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

A partir de esta definición, la ecuación general de la hidrostática es la siguiente:

$$dP = \rho * g * dh$$

Donde:

- ρ , es la densidad del fluido
- g, Aceleración gravitatoria de la tierra
- h, Altura

- P, Presión

La viscosidad se manifiesta en líquidos y gases en movimiento. Se ha definido la viscosidad como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Esta viscosidad recibe el nombre de viscosidad absoluta o viscosidad dinámica y se representa por la letra griega μ ($\frac{N \cdot seg}{m^2}$). Se conoce también otra viscosidad, denominada viscosidad cinemática, y se representa por ν . La viscosidad cinemática de los aceites se determina, a menudo, con un instrumento llamado viscosímetro universal Saybolt. Matemáticamente para calcular la viscosidad cinemática basta con dividir la viscosidad dinámica por la densidad del fluido ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{m^2}{seg} \right)$$

La unidad de medida más conocida para la viscosidad cinemática es el *Stoke* ($\frac{cm^2}{seg}$)

2.9. Diseño asistido por computadora (CAD)

El software de diseño asistido por ordenador, mayormente conocido por las siglas *CAD* que provienen del inglés Computer-Aided Design, es un software para crear y editar modelos bidimensionales y tridimensionales de objetos físicos. Consiste en el uso de programas de ordenador para crear, modificar, analizar y documentar representaciones gráficas bidimensionales o tridimensionales (2D o 3D) de objetos físicos como una alternativa a los borradores manuales y a los prototipos de producto ([Siemens, 2022]). El CAD permite a los ingenieros probar de forma interactiva las variantes de diseño con el número mínimo de prototipos físicos, con el objetivo de:

- Agilizar el proceso de diseño, mejorar la visualización de los subensambles, de las piezas y del producto final.
- Reutilizar fácilmente los datos de diseño y las mejores prácticas.
- Obtener una documentación más sólida y sencilla del diseño, que incluye geometrías, dimensiones y listas de materiales.
- Lograr una mayor precisión para reducir los errores.

De acuerdo con [Zhong, 2010] actualmente, existen cuatro tipos de software de diseño asistido:

- Software bidimensional, como *Photoshop*, *Illustrator*, *CorelDraw*, etc., utilizado principalmente para dibujar representaciones de productos en dos dimensiones. Como ventajas, es conveniente, intuitivo y eficiente; sin embargo, su desventaja es el carecido sentido tridimensional, no se puede generar una observación dinámica multiángulo y modificar tridimensionalmente.
- Software tridimensional, como *Rhinoceros 3D*, *3Ds Max*, *Maya*, etc., se puede generar una observación dinámica multiángulo y modificación tridimensional, pero el modelo de datos no puede ser directamente utilizado para la producción y el procesamiento.
- Software de renderizado, como *V-Ray*, *Brazil R/S*, *Cinema 4D*, etc., pueden generar una vívida y artística representación, pero sin modelado.

- Software tridimensional de ingeniería como *Inventor*, *PRO/E*, *UG* y otros, como ventajas, el software facilita el análisis mecánico, de materiales, el proceso del diseño, y el modelo de datos puede ser directamente utilizado en la producción. El inconveniente es que el modelado es mucho más complejo, no obtendrá representaciones de alta calidad y se necesita tener algún conocimiento previo de la ciencia e ingeniería.

En este trabajo de tesis se utilizó el software de automatización de diseño mecánico *Inventor* (*Autodesk*) que es una herramienta de diseño de modelado sólido paramétrica y basada en operaciones, elegido debido a sus variadas características y herramientas con las que cuenta, así como la opción de exportación a página web para su futura integración con un emulador de procesos.

Se dice que este software es paramétrico ya que las cotas y las relaciones utilizadas para crear una operación se capturan y se almacenan en el modelo. Gracias a ello, no sólo es posible la captura de la intención del diseño, sino que también se pueden realizar de manera rápida y sencilla cambios en el modelo.

Del mismo modo que un ensamble está compuesto por una serie de piezas individuales, un modelo de *Inventor* también está compuesto por elementos individuales. Dichos elementos se denominan operaciones. Dichas operaciones, son operaciones geométricas inteligentes y fáciles de entender, como salientes, cortes, taladros, nervios, redondeos, chaflanes y ángulos de salida. A medida que se crean estas operaciones, las mismas se aplican directamente a la pieza en desarrollo.

Capítulo 3

Implementación del gemelo digital

En este capítulo se desarrolla la implementación del gemelo digital, dicho desarrollo se divide en dos partes, el modelado 3D asistido por computadora, en la sección 3.1 donde se proporciona especial detalle tanto funcional como de ensamble a los componentes principales de la planta hidráulica como lo son las válvulas de control, válvulas de corte, tanque de techo abierto, tanque de techo cerrado, rotámetro y la placa de orificio. Así mismo se pueden encontrar mas elementos de la planta hidráulica que son mas comunes y presentan un menor grado de detalle interno. Con esto se obtiene el primer nivel de manifestación de un gemelo digital, el *Digital twin prototype, DTP*. En la sección 3.2 se desarrolla la implementación del modelo matemático que describe la dinámica del sistema mediante ecuaciones diferenciales e implementado en *MatLab Simulink*.

3.1. Modelo tridimensional de la planta hidráulica

En la Figura 3.1 se observa la planta hidráulica completa, ubicada en el laboratorio de automatización industrial de la division de ingeniería eléctrica electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Dicha planta consta de dos tanques atmosféricos, uno de techo abierto y otro de techo cerrado interconectados entre sí mediante tubería galvanizada y válvulas de control de flujo hidráulicas, así como transductores de medición de flujo, medidores de presión análogos, sistema de bombeo, entre otros.

Dentro del sistema de control y medición de flujo se encuentran dos válvulas de corte de accionamiento neumático accionadas mediante dos válvulas neumáticas de dos estados, dos válvulas de control de accionamiento neumático, accionadas por dos transductores que se encargan de regular la presión neumática aplicada a cada válvula y así controlar el nivel de apertura de las válvulas.

Cuenta también con ocho válvulas de paso manuales, dos rotámetros, cuatro transmisores de presión diferencial y un sensor de nivel de conductividad. Todo esto acoplado con tubería de 1 pulgada y de 3/4 de pulgada galvanizada a dos bombas centrífugas de 1 caballo y 1/2 caballo de potencia como sistema de bombeo.

Cada componente de la planta hidráulica fue modelado paramétricamente con ayuda del modelado de cada pieza interna que compone a cada elemento de la planta, posteriormente se ensamblan dichas piezas en su posición original para lograr un solo ensamble de cada componente, posteriormente, cada ensamble es insertado en un ensamble general compuesto de subensambles antes desarrollados, lo que da lugar al ensamble final de toda la planta hidráulica.



Figura 3.1 Planta hidráulica

Para lograr dicho ensamble general con cada componente, se realizó un levantamiento de campo donde se tomó lectura de las medidas de cada componente mediante herramientas como el pie de rey, el flexómetro y fotos de los elementos para así ubicarlos dentro de la planta hidráulica y al mismo tiempo ubicar sus conexiones con otros elementos de la planta. Con ayuda de las fotografías, fue

posible obtener el ID o número de parte de cada elemento para recabar especificaciones técnicas del fabricante como información adicional al levantamiento de campo antes realizado y poder iniciar con el modelado paramétrico con ayuda de la herramienta de diseño asistido por computadora.

Al término del diseño de cada pieza se agregaron texturas y materiales utilizados para la manufactura de la pieza física, al mismo tiempo se realizó un renderizado para obtener una vista más real de las texturas y colores de cada pieza.

Al concluir de ensamblar cada subensamble se cumplió con los requerimientos y características con las que debe contar la manifestación del gemelo digital del tipo *DTP*, *Digital Twin Prototype* que se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.2 Ensamble del modelo paramétrico de planta hidráulica

3.1.1. Modelo tridimensional de válvula hidráulica de control Orion serie 9000

La válvula de control U.S. serie 9000 de tipo globo clase 300 es una válvula con bonete atornillado y válvula interior postguiada. El cuerpo de la válvula, el bonete o actuador neumático modelo PA35 y la válvula interna son manufacturados de acero inoxidable 316SS u opcional de aleación C. El diámetro de la conexión a tubería de la válvula instalada en la planta hidráulica es de 1 pulgada, existen válvulas para tubería mas grande, sin embargo, cada válvula está disponible con varios tamaños de válvulas internas, la más grande cuenta con un asiento integral para brindar el máximo coeficiente de caudal(K_v), a diferencia de las demás válvulas que cuentan con un asiento reemplazable.

Tabla 3.1 Datos técnicos de válvula de control Orion serie 9000

Parámetro	Magnitud
No. de serie	196143
Tamaño de conexión	1.0 in
Rango de señal neumática	3-15 PSIG
Presión máxima de trabajo	60 PSIG
Modelo de actuador	PA35
Material del cuerpo de la válvula	Acero 316SS
Modelo de válvula de control	9001-GC-W36-SV-1-A-09-L-36
Flujo máximo(C_v)	8.3

El actuador neumático modelo PA35 está disponible con dos funciones -aire para abrir/resorte para cerrar o aire para cerrar/resorte para abrir- y es reversible gracias a que solo es necesario cambiar el flujo de entrada de aire debajo o por encima del diafragma interno. El material del diafragma es una combinación de nitrilo/poliéster para lograr la flexibilidad requerida y la hermeticidad para contener la presión del aire suministrado, al mismo tiempo funciona como un espaciador/centrador entre las paredes del bonete y el vástago de accionamiento.

El actuador instalado en la planta hidráulica viene con 3 resortes para un rango de señal de 3-15 psi(0,2-1 bar), ajustable de 8-20 psi. También existe un modelo de 6 resortes para un rango de señal de 6-30 psi(0,4-2 bar). Ambos rangos son ajustables para igualar la fuerza aplicada con la carga del vástago de acuerdo a los requisitos de la aplicación. Para obtener la presión necesaria de aire en la entrada al actuador neumático es necesario contar con un transductor neumático que de acuerdo a una señal eléctrica proveniente del controlador industrial(PLC), la presión de aire será ajustada a la entrada del actuador neumático, dicho transductor será explicado más a fondo en la sección 3.1.9.

En la Figura 3.3 se observa la válvula de control serie 9000 que se compone principalmente por el bonete o actuador neumático modelo PA35 en color rojo atornillado al soporte principal que se encarga de unirlo y centrarlo al cuerpo de la válvula. El bonete se divide en dos secciones unidas mediante tornillos, cada sección cuenta con una entrada de aire, una en el bonete superior y otra en el bonete inferior. De acuerdo a la función que se desee utilizar se deben hacer los ajustes necesarios con las tuercas de ajuste(tuerca de tope y tuerca de extensión) en el vástago principal de la válvula y así ajustar su posición adecuada.

En la Figura 3.4 se observa el ensamble del modelo paramétrico de cada pieza de la válvula de control serie 9000(Figura 3.4a) seguida de su respectiva vista de sección(Figura 3.4b) en la que



Figura 3.3 Válvula de control Orion serie 9000
[Badger Meter, 2022]



(a) Modelo paramétrico de válvula de control

(b) Vista de sección del modelo de válvula de control

Figura 3.4 Ensamble del modelo paramétrico de válvula de control serie 9000

podemos apreciar con detalle cada componente de la válvula y visualizar el funcionamiento de los componentes internos que a simple vista no se vislumbran. En esta vista de sección se puede apreciar el bonete que se compone de dos secciones (cada una con toma de presión de aire/salida a la atmósfera), el diafragma interno que hace posible el movimiento vertical del vástago de la válvula, el platillo o pistón del diafragma que sirve para dar soporte y rigidez al diafragma para así evitar flexiones en este

y con ello pérdidas de presión así como para dar soporte y estabilidad a los resortes de apertura/cierre de la válvula, el vástago de la válvula que se encuentra conformado por diferentes acoplamientos para lograr la longitud deseada así como el platillo o arandela indicadora de la apertura de la válvula, hacia la parte inferior se encuentra acoplado el cuerpo de la válvula en el que se puede apreciar la posición del asiento y la cabeza del vástago (los dos elementos que hacen posible el control o regulación del caudal que pasa a través de la válvula).

Para poder realizar los cálculos necesarios para obtener el modelo matemático con ayuda de ecuaciones diferenciales se recurrió a la siguiente tabla de la Figura 3.5 extraída de las especificaciones técnicas del fabricante.

Valve Size	Orifice Dia. in. (mm)	Orif. area in. ² (mm ²)	F _L	Seat Config.	Cv (Linear)	Cv (%)	Max. Oper. ΔP psi (bar)	Max ΔP Shutoff
2 in. (50.8 mm)	1.500 (38.1)	1.77 (1141.9)	0.85	Integr.	25	20	150 (10.3)	300*
	1.125 (28.6)	1.00 (645.2)	0.86	Repl.	21	17	275 (19.0)	550*
	0.812 (20.9)	0.52 (335.5)	0.88	Repl.	15	14	540 (37.2)	720*
	0.625 (15.9)	0.31 (200.0)	0.90	Repl.	7	6.5	660 (45.5)	720
1-1/2 in. (38.1 mm)	1.250 (31.8)	1.23 (793.5)	0.85	Integr.	15.5	13	225 (15.5)	450*
	0.812 (20.9)	0.52 (335.5)	0.87	Repl.	11	10	540 (37.2)	720*
	0.625 (15.9)	0.31 (200.0)	0.90	Repl.	7	6.5	660 (45.5)	720
	0.625 (15.9)	0.31 (200.0)	0.92	Repl.	4	4	660 (45.5)	720
1 in. (25.4 mm)	0.812 (20.9)	0.52 (335.5)	0.85	Integr.	8.3	7.0	540 (37.2)	720*
	0.500 (12.7)	0.20 (129.0)	0.87	Repl.	5.3	4.5	660 (45.5)	720
	0.500 (12.7)	0.20 (129.0)	0.89	Repl.	2	2	660 (45.5)	720
	0.500 (12.7)	0.20 (129.0)	0.91	Repl.	1	1	660 (45.5)	720
	0.156 (4.0)	0.02 (12.9)	0.93	Repl.	0.5	0.5	720 (49.6)	720
	0.156 (4.0)	0.02 (12.9)	0.94	Repl.	0.2	0.2	720 (49.6)	720
	0.156 (4.0)	0.02 (12.9)	0.95	Repl.	0.1	0.1	720 (49.6)	720
	0.156 (4.0)	0.02 (12.9)	0.96	Repl.	0.05	0.05	720 (49.6)	720
	0.156 (4.0)	0.02 (12.9)	0.97	Repl.	0.02	N/A	720 (49.6)	720

The largest Cv in each valve size has an integral seat. All other Cv's have replaceable seats.

Figura 3.5 Especificaciones técnicas de válvula de control Orion Serie 9000
[Badger Meter, 2022]

3.1.2. Modelo tridimensional de válvula hidráulica de corte Swagelok SS-65TS16

La válvula de corte Swagelok de bola es una válvula de tipo ON/OFF de 3 piezas debido a su diseño de construcción con actuador neumático de piñón y cremallera Swagelok serie 133 (modelo MS-133-SR) diseñado para accionar válvulas de bola normalmente cerradas. El actuador instalado en la planta hidráulica permite un accionamiento de 90° con retorno por resorte para válvulas de dos vías, sin embargo, existen también actuadores de doble efecto para aplicaciones que así lo requieran.

En la Figura 3.6 se observan los componentes exteriores de la válvula de corte que hacen posible su funcionamiento, en la parte superior se encuentra el actuador neumático de retorno por resorte de color negro, a la toma de presión de dicho actuador se encuentra conectada una válvula solenoide neumática MAC con operador de 4 vías y 2 posiciones que permite el paso de aire hacia el pistón del actuador neumático de acuerdo a una señal eléctrica proveniente del controlador industrial. Dicha válvula neumática será vista más a fondo en la sección 3.1.3. En la parte central se encuentra el conjunto de montaje de actuador para válvulas de bola serie 65 que permite el empotramiento de todo el conjunto hacia la pared o soporte y al mismo tiempo une el actuador neumático con el cuerpo de

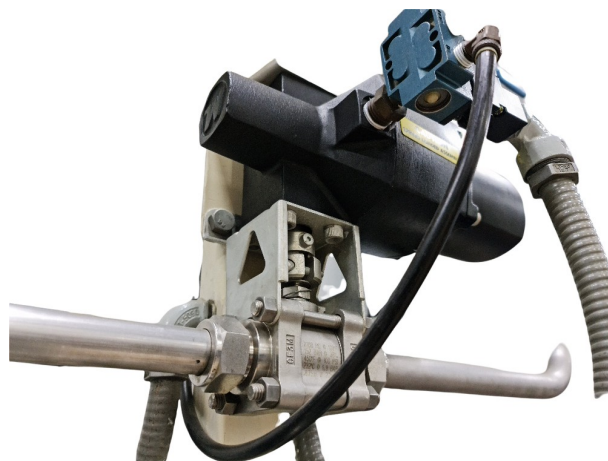
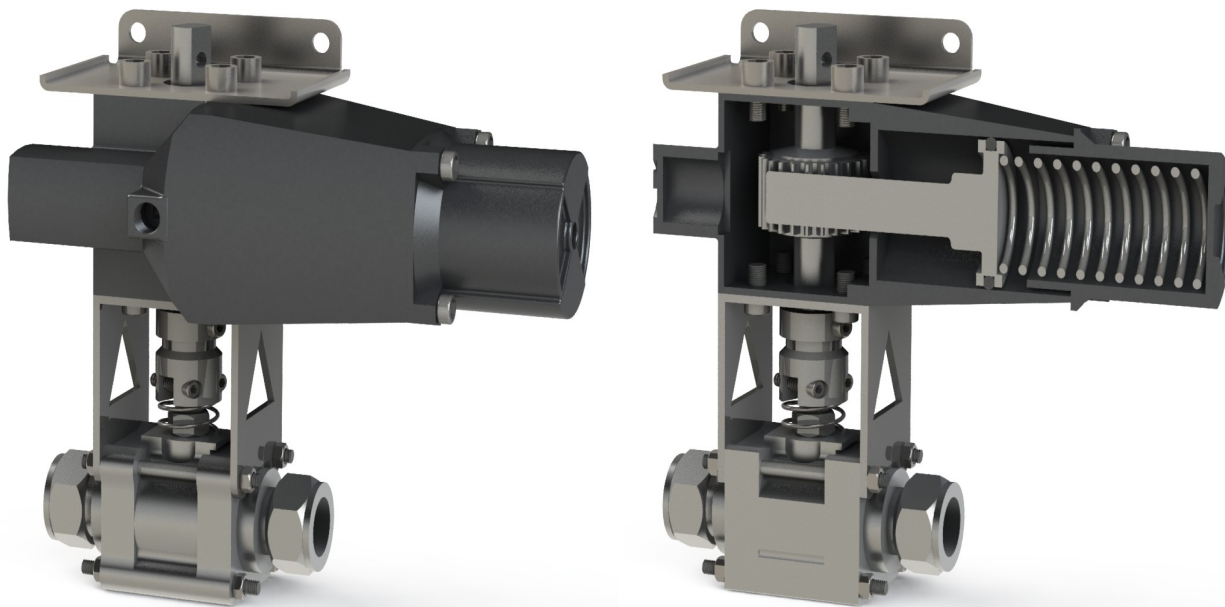


Figura 3.6 Válvula de corte Swagelok SS-65TS16

la válvula. En la parte central de dicho conjunto de montaje se encuentra el acoplamiento del eje de salida o piñón del actuador neumático con el eje o vástago de la válvula de bola.

El diámetro de la conexión a tubería de la válvula instalada en la planta hidráulica es de 1 pulgada, el material de construcción es acero inoxidable. Los materiales del actuador neumático son aleación de aluminio fundido anodizado con acabado exterior de uretano negro para el cuerpo o carcasa, aleación de aluminio fundido para el pistón interno, acero aleado con fosfato de zinc para el resorte de retorno interno, acero 416SS endurecido para el eje de salida o piñón y aleación de acero-cadmio para la cremallera.



(a) Modelo paramétrico de válvula de corte

(b) Vista de sección del modelo de válvula de corte

Figura 3.7 Ensamble del modelo paramétrico de válvula de corte Swagelok

En la Figura 3.7 se muestra el ensamble del modelo paramétrico tridimensional de todas las piezas que conforman a la válvula de corte(Figura 3.7a) y por otro lado se encuentra la vista de sección del

actuador neumático(Figura 3.7b) que se encarga de accionar la válvula de bola, se puede observar el pistón de accionamiento aislado mediante O-rings que genera dos cámaras de presión de aire(una de cada lado del pistón), enseguida se encuentra unido a la cremallera que hace posible el movimiento giratorio del piñón y del otro lado del pistón se encuentra el resorte de retorno dentro de una cámara con toma de presión directa a la atmósfera para permitir la expulsión de aire conforme se contraiga o expanda dicha cámara.

Tabla 3.2 Datos técnicos de válvula de corte Swagelok

Parámetro	Magnitud
Tamaño de conexión	1.0 in
Modelo de actuador	ss-63ts8-33c
Presión máxima del actuador	200 PSIG/37°C
Presión de actuación	25-150 PSIG/37°C
Material del cuerpo	316SS
Modelo de válvula de corte	ss-65ts16-35cd
Flujo máximo(Cv)	40
Presión/Temperatura máxima de válvula de corte	2200 PSIG/100°F (151 BAR/37°C)

En la tabla 3.2 se encuentran los datos técnicos obtenidos de hojas de especificaciones del fabricante que serán utilizados en la resolución del modelo matemático con base en ecuaciones diferenciales. De igual forma dichos datos técnicos fueron de gran utilidad para obtener las dimensiones correctas de la válvula de bola y del actuador neumático para lograr la representación tridimensional, fiel a los elementos físicos instalados en la planta hidráulica.

3.1.3. Modelo tridimensional de válvula neumática MAC Series 900

La válvula neumática MAC Serie 900 es una pequeña válvula de 4 vías con un coeficiente de flujo(Cv) de hasta 1.4 de flujo máximo. Esta serie proporciona respuesta rápida, larga vida útil y alto flujo que no se encuentran comúnmente en válvulas de este tamaño. Es una válvula de 2 posiciones, con operador simple de solenoide, se encuentra disponible también con operadores manuales y mecánicos, el suministro eléctrico con el que funciona esta válvula es de 24 vdc.

Tabla 3.3 Datos técnicos de válvula neumática MAC Series 900

Parámetro	Magnitud
Tamaño de puertos de conexión	1/4 IN NPTF
Consumo	6.0 W
Presión de operación	25 - 150 PSI
Modelo	912B-PM-501JM
Cv	1.4

En la tabla 3.3 se encuentran los datos técnicos del fabricante y de igual forma en la Figura 3.8 se muestra el modelo paramétrico de la válvula MAC serie 900, la cual se constituye del solenoide que acciona a la válvula por medio de una señal eléctrica empotrado en la parte superior de esta, en la parte inferior se puede observar el cuerpo de la válvula, el cual cuenta con 4 puertos de conexión, a los cuales se conectan la entrada de presión de aire, el filtro de salida a la atmósfera y la salida de presión hacia la válvula de corte. Esta válvula es utilizada como medio de control de la presión suministrada al actuador de la válvula de corte de tipo ON/OFF, debido a esto último la presión requerida en el actuador se encontrará presente o ausente gracias al diseño de operación de la válvula MAC serie 900.



Figura 3.8 Modelo paramétrico de válvula neumática

3.1.4. Modelo tridimensional de placa de orificio Emerson

La placa de orificio Emerson modelo Rosemount 1495 de la Figura 3.9 es una placa concéntrica de acero inoxidable 316SS con paleta tipo 150#, sin acabado y con diámetro interno de 0.735 in(1.8669 cm) y un espesor de 0.125 in(3.2 mm), principalmente utilizada para medir caudal mediante la lectura de un diferencial de presión en ambos lados de la placa. Esta placa de orificio ofrece una configuración estándar con un orificio concéntrico con borde cuadrado en las placas tipo remo y universal, diseñada para tubería de 2-24 in.



Figura 3.9 Placa de orificio Emerson
[Emerson Electric, 2022]

Es instalada con ayuda de dos bridas, las cuales son de acero inoxidable unidas mediante tornillos de sujeción que presionan y sellan al mismo tiempo, con esto se logra colocar la placa en la trayectoria del caudal para crear un incremento en la velocidad y una disminución de la presión.

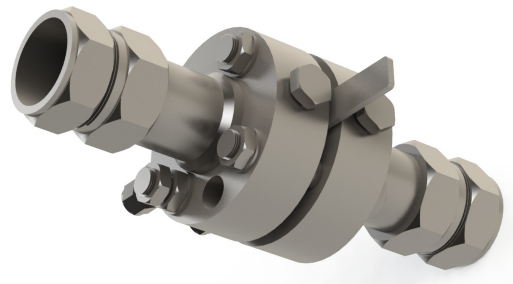


Figura 3.10 Ensamble del modelo paramétrico de placa de orificio Emerson

En la Figura 3.10 se muestra el conjunto de la placa de orificio ensamblado, desde las bridas principales, los tornillos de sujeción, la placa de orificio así como los tubos de toma de presión. Para acoplar las bridas manufactureras para tubería de 2 in, fue necesario el uso de tubería de 2 in acopladas a la brida y posteriormente se utilizó una reducción a tubería de 1 in que fue la que se utilizó para todos los ductos de transporte de fluido.

3.1.5. Modelo tridimensional de rotámetro Fisher&Porter

El rotámetro Fisher&Porter es un medidor de caudal de área variable, lo que significa que un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. La selección del tamaño de un rotámetro es laboriosa ya que en los cálculos del caudal que pasa a través de dicho rotámetro se toman en cuenta muchas variables como el peso del flotador, su volumen, densidad del fluido, fuerza de arrastre, coeficiente de arrastre, área del flotador, sección interior del tubo, entre otras.



Figura 3.11 Ensamble del modelo paramétrico de rotámetro Fisher&Porter/ABB

En la Figura 3.11 se observa el ensamble de cada pieza que compone al rotámetro, el cual se compone del cuerpo o carcasa que se divide en dos secciones, el tubo de área variable aislado mediante O-rings y el soporte de empotramiento. El rango de medición de caudal de este rotámetro es de 0-30 galones por minuto, su precisión de lectura es de $\pm 2\%$, su diámetro de conexión es de 4 in por lo que fue necesario el uso de reducciones a 1 pulgada para poder acoplarlo a las tuberías utilizadas y su presión máxima de trabajo es de 150psig / 200°F. El material del tubo de área variable es vidrio de borosilicato de manera que se pueda observar el flotador en el interior, el material del cuerpo o carcasa y del soporte de empotramiento es acero inoxidable 316SS.

3.1.6. Modelo tridimensional de tanque de techo abierto

El tanque atmosférico de techo abierto se muestra en la Figura 3.12, el material de construcción es acero inoxidable 316SS, presenta dos tomas de agua en la parte inferior (una de drenaje y otra de transferencia de fluido), en la parte lateral cuenta con un vidrio de nivel de manera que se pueda observar el nivel dentro del tanque a simple vista, en la parte superior trasera cuenta con una conexión de llenado y en la parte frontal inferior se encuentra una toma de presión conectada al transmisor de presión diferencial SMAR LD301 encargado de transmitir dicha lectura al controlador industrial (PLC) y realizar el debido control de la planta hidráulica.



Figura 3.12 Ensamble del modelo paramétrico de tanque de techo abierto

3.1.7. Modelo tridimensional de tanque de techo cerrado

El tanque atmosférico de techo cerrado se muestra en la Figura 3.13, el material de construcción es acero inoxidable 316SS, presenta dos tomas de agua en la parte inferior (una de drenaje y otra de transferencia de fluido), en la parte lateral derecha cuenta con un vidrio de nivel de manera que se pueda observar el nivel dentro del tanque a simple vista, en la parte superior cuenta con un sensor de nivel de conductividad, una conexión de llenado y una conexión a tubería de transferencia, por último en la parte lateral e inferior izquierda se encuentra una toma de presión que se encuentra conectada al transmisor de presión diferencial Moore Serie 340D que se encargará de transmitir dicha lectura al controlador industrial (PLC) y realizar el debido control de la planta hidráulica.



Figura 3.13 Ensamble del modelo paramétrico de tanque de techo cerrado

3.1.8. Modelo tridimensional de manómetro

El manómetro de la Figura 3.14 es utilizado en diferentes componentes de la planta hidráulica para medir a simple vista mediante su carátula análoga la presión manométrica, la cual es la presión relativa a la presión atmosférica. La presión manométrica es positiva para presiones por encima de la presión atmosférica, y negativa para presiones por debajo de ella. En caso del transductor Fisher 646 de la sección 3.1.9 y del regulador de filtro Fisher de la sección 3.1.10 se utiliza un manómetro para realizar las calibraciones necesarias al cotejar la señal eléctrica de entrada al transductor con la

presión real que este genera. También es utilizado como medio de prevención de sobrecarga de presión en la tubería de transferencia de fluido.



Figura 3.14 Ensamble del modelo paramétrico de manómetro

3.1.9. Modelo tridimensional de transductor Fisher 646

El transductor Fisher 646, que se muestra en la Figura 3.15, recibe una señal de entrada de Corriente continua (CC) de 4 a 20 miliamperios y genera una presión proporcional de 0,2 a 1,0 bar(3 a 15 psig) de presión de salida neumática a un elemento de control final, en este caso la válvula de control Orion serie 9000.

Tabla 3.4 Datos técnicos de transductor Fisher 646

Párametro	Magnitud
SERIAL No.	11691670
TYPE	646FM
PRESS UNITS	PSI
INPUT	4 to 20 mA
OUTPUT	3 to 15 psi
AMBIENT TEMP	-40° to 160°F

La presión de suministro debe ser aire limpio y seco, para esto se debe utilizar un regulador de filtro Fisher 67CFR de la sección 3.1.10 con filtro estándar de 5 micrómetros, o equivalente, para filtrar y regular el aire de suministro. Se puede instalar un manómetro de salida en el regulador para indicar la presión de suministro al transductor. Además, como ayuda para la calibración, se puede usar un segundo manómetro instalado en el transductor para indicar la presión de salida del transductor. La fuente de suministro se conecta a la conexión 1/4 NPT en el filtro regulador(sí se incluye) o a la conexión de suministro de 1/4 NPT en la caja del transductor(sí el regulador de filtro no está

instalado). Todas las conexiones de presión del transductor son conexiones internas de 1/4 NPT. Para su correcto funcionamiento se debe utilizar tubería de 10mm(3/8 de pulgada) para todas las conexiones de presión.

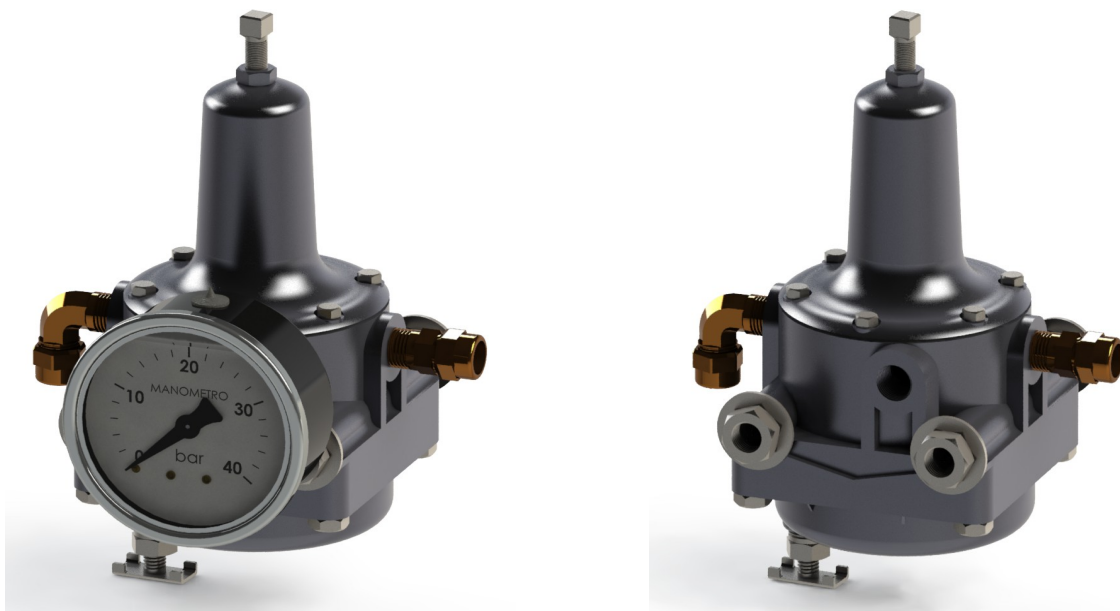


Figura 3.15 Ensamble del modelo paramétrico de transductor Fisher 646

3.1.10. Modelo tridimensional de regulador de filtro Fisher 67CFR

El regulador de filtro se puede montar en un soporte con el transductor o montado en el saliente de montaje del actuador, es utilizado principalmente para proporcionar una presión constante y adecuada, requerida a la entrada del controlador neumático o electro-neumático así como para otros instrumentos que lo requieran como mandriles de aire, chorros de aire, pistolas rociadoras, etc. En la Figura 3.16 se muestra el ensamble del modelo donde podemos visualizar cada uno de sus componentes externos, en la parte superior se encuentra el tornillo de ajuste de presión del resorte interno, en el lateral izquierdo la toma de presión de entrada, en el lateral derecho la toma de presión regulada de salida que se conecta directamente al controlador electro-neumático, en la parte frontal el manómetro de ajuste de presión de salida y por último en la parte inferior un tornillo de cabeza de mariposa para drenar el agua generada dentro del regulador debido a la condensación del agua contenida en las partículas del aire; fenómeno natural y un subproducto de la compresión del aire.

Su principio de operación se basa en regular la presión ejercida por un resorte que servirá de punto de referencia para la presión suministrada. En la Figura 3.17 se muestra el esquema de operación



(a) Modelo paramétrico de regulador de filtro Fisher 67CFR (b) Modelo paramétrico de regulador de filtro sin manómetro

Figura 3.16 Ensamble del modelo paramétrico de regulador de filtro Fisher 67CFR

del regulador, donde la presión aguas abajo se mantiene en la parte inferior del diafragma interno, cuando la presión aguas abajo es igual a la presión del resorte o superior, el obturador de la válvula se sujeta contra el orificio y no hay flujo a través del regulador. Cuando aumenta la demanda, la presión aguas abajo cae ligeramente, el resorte se extiende, mueve el vástago hacia abajo así como el tapón de la válvula lejos del orificio, con ello se obtiene mayor flujo a través del regulador para mantener la presión a la salida.

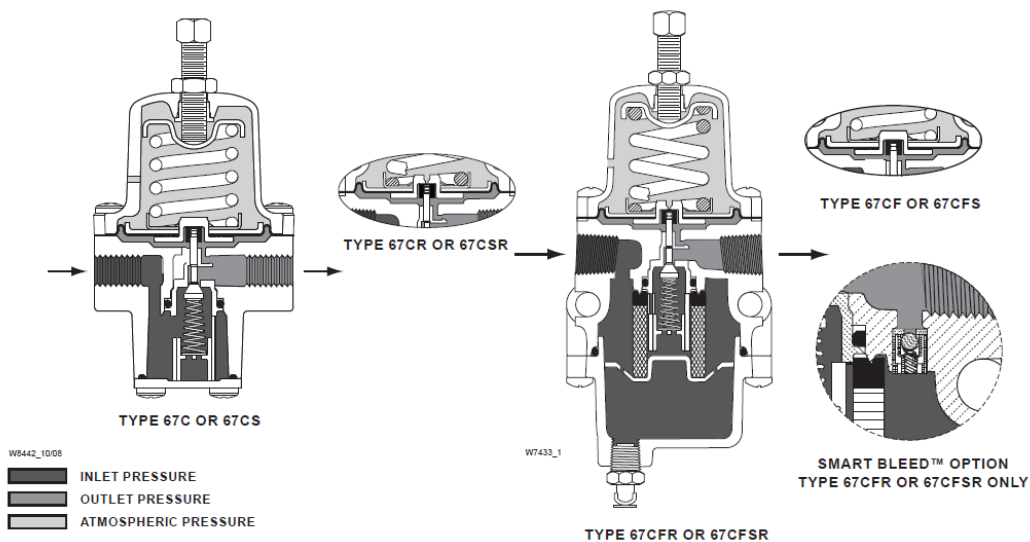


Figura 3.17 Esquema de operación de regulador serie 67C [Emerson Electric, 2020]

3.1.11. Modelo tridimensional de Transmisor de presión diferencial SMAR LD301

El transmisor de presión diferencial SMAR LD301 es un transmisor inteligente de presión con control Control Proporcional Integral Derivativo (PID) incorporado y se basa en un sensor capacitivo que ofrece un funcionamiento seguro y de alto rendimiento. Presenta una interfaz entre el campo y la sala de control que permite seleccionar varios tipos de funciones de transferencia. Es utilizado para medir presiones de líquidos, condensados, vapores y gases húmedos, de acuerdo al tipo de fluido, la posición del transmisor en relación a las tomas cambiará(Figura 3.18), de igual forma, las líneas de impulso deberán estar inclinadas a razón de 1:10 para evitar la acumulación de burbujas.

Fluido del Proceso	Localización de las Tomas	Ubicación del LD301 con relación a las tomas
Gas	Superior o lateral	Sobre las tomas
Líquido	Lateral	Abajo de las tomas, o en el mismo nivel
Vapor	Lateral	Abajo, si hay cámara de condensación

Figura 3.18 Localización de las tomas de presión
[Smar Technology, 2010]

Las terminales de prueba y de comunicación permiten, respectivamente, medir la corriente en la malla de 4-20 mA, sin abrir el circuito, y establecer comunicación con el transmisor. Las “Terminales de Prueba” son utilizadas para medir corriente. La Terminal “COMM” se usa para la comunicación HART. El bloque de terminales tiene tornillos en donde las terminales de tipo gancho o de anillo pueden ser conectados([Smar Technology, 2010]).

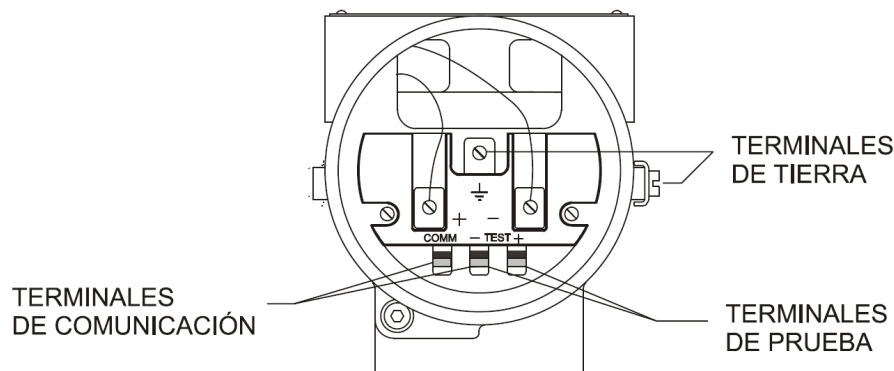
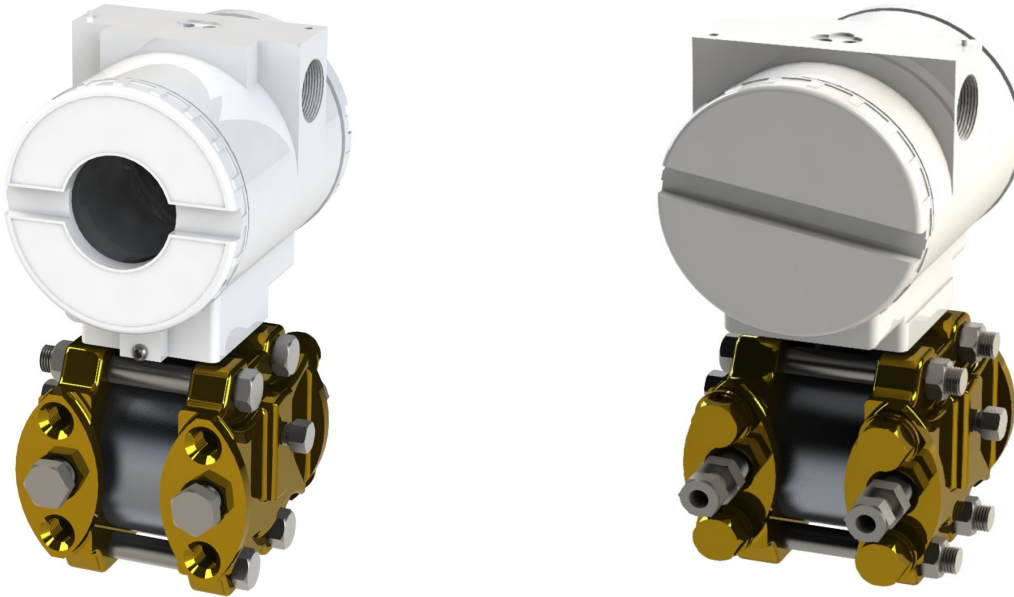


Figura 3.19 Bloque de conexión eléctrica
[Smar Technology, 2010]

El transmisor de presión diferencial es empotrado mediante abrazaderas a la estructura principal que sostiene toda la tubería, válvulas, sensores y demás componentes de la planta hidráulica. En la Figura 3.20 se muestra el ensamble del modelo paramétrico y sus diferentes componentes que lo constituyen. En la parte frontal(Figura 3.20a) se encuentra el display de configuración, los orificios de sujeción al soporte de empotramiento y los tapones de las tomas de presión que sirven de purga de aire en las líneas de presión del transmisor, en la parte superior se observan los orificios de ajuste

local para la calibración del cero y "Span"(rango máximo de medición - rango mínimo de medición) mediante un destornillador magnético. En la vista trasera(Figura 3.20b) se encuentran los puntos de toma de presión así como los tapones de purga laterales y la tapa que cubre las terminales de prueba y comunicación.



(a) Vista frontal de transmisor de presión diferencial (b) Vista trasera de transmisor de presión diferencial

Figura 3.20 Ensamble del modelo paramétrico de transmisor de presión diferencial SMAR LD301

3.1.12. Modelo tridimensional de Transmisor de presión diferencial Moore Serie 340D

El transmisor de presión diferencial Moore serie 340D es un sensor de presión diferencial que ofrece un PID para ofrecer capacidades de detección y control de procesos en un único instrumento y eliminar la necesidad de un controlador separado para manejar bucles PID básicos. Su señal de salida como transmisor es de 4 - 20 mA que será transmitida directamente hacia el elemento de control final, en este caso al PLC mediante el protocolo de comunicación Highway addressable remote transducer(HART, por sus siglas en inglés), donde será procesada y analizada para generar el control deseado de la planta hidráulica. Este tipo de transmisor es apropiado, pero no limitado para medir:

- Flujo.
- Presión manométrica.
- Nivel.
- Presión de tiro.
- Presión absoluta
- Altas presiones diferenciales.

- Aforo de tanques hidrostáticos.

Todos los modelos de transmisor Serie 340 son intrínsecamente a prueba de explosiones, las conexiones de conductos eléctricos son tamaño 1/2 NPT o M20, su rango de temperaturas de operación es de 0-85 °C y el rango presión del sensor capacitivo es de hasta 1.25 kPa. Su construcción es de acero inoxidable 316SS para las piezas que se encuentran en contacto directo con el fluido y la cubierta es manufacturada en aluminio fundido con bajo contenido de cobre y recubierta epoxi. Algunas consideraciones eléctricas y de comunicación que se deben tener en cuenta al momento de instalar este transmisor son las siguientes:

- Determinar el modo de operación del transmisor (Análogo o digital) y el tipo de red necesaria.
- Determinar los requisitos de suministro de energía mínimos.
- Seleccionar el tipo de cable biaxial que se requiere y el largo de este.
- Determinar la necesidad de uniones de red.
- Considerar el efecto de conectar equipo adicional a la red.
- Considerar un buen blindaje y puesta a tierra.

En la Figura 3.21 se observa el ensamble del transmisor y sus partes que lo componen, en la parte superior se puede observar el conjunto de procesamiento de la señal de salida que se encarga de evaluar la señal proveniente del sensor de presión capacitivo (MycroSENSOR), en la parte inferior se encuentra la capsula que contiene al sensor de presión capacitivo unida mediante dos bridas a las que se conectan las tomas de presión.

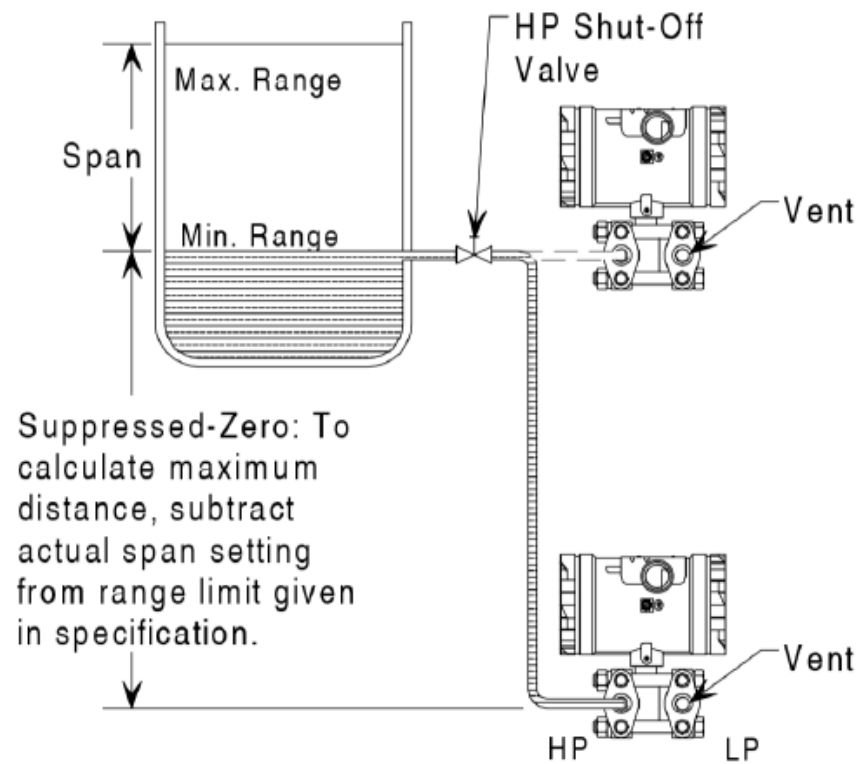


Figura 3.21 Modelo paramétrico de transmisor de presión diferencial Moore 340D

Al momento de instalar este transmisor se deben tener en cuenta aspectos de posicionamiento para que el sensor pueda obtener lecturas correctas como:

- El transmisor debe ser empotrado al mismo nivel o por debajo del nivel mínimo del fluido a medir.
- Se requiere de una válvula de paso en la tubería de toma de presión que será de ayuda en caso de mantenimiento o algún problema con el sensor.
- En el caso de instalar el transmisor por debajo del nivel mínimo del fluido, toda la longitud de la tubería se debe mantener llena de fluido para que actúe como referencia.

En la Figura 3.22 se muestra la instalación del transmisor por debajo del nivel mínimo del fluido y las variables que se deben tomar en cuenta para obtener las mediciones correctas.



C Open Vessel Installation

Figura 3.22 Instalación del transmisor por debajo del nivel mínimo en tanques atmosféricos [Moore, 1998]

3.2. Modelo matemático del sistema físico

Para generar el modelo matemático que represente en comportamiento al modelo físico se utilizó el análisis desde la perspectiva de la mecánica de fluidos, donde se generó la ecuación de balance de energía a lo largo de la tubería dividida en dos bifurcaciones mediante una conexión en "T", una bifurcación concluye de nuevo en la entrada al tanque 1 y la otra bifurcación concluye en la entrada de fluido al tanque 2. De esta manera se pueden generar ecuaciones que representan la mecánica del fluido en la tubería que consideran pérdidas de carga en diferentes tipos de conexiones y que al resolverlas de manera simultánea se puede obtener el resultado del caudal y velocidad del líquido en cada bifurcación de la tubería; también se consideran las condiciones iniciales y con ello se obtiene la altura del líquido en cada tanque.

A continuación se presenta el diagrama de tuberías e instrumentación correspondiente a la planta hidráulica en cuestión a modo de visualizar mediante una representación gráfica el flujo del proceso para que este sea lo más claro posible ya que contiene detalles de las tuberías, servicios e instrumentación así como esquemas de control y señales de acuerdo a la norma International Society of Automation (ISA, por sus siglas en inglés) 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5

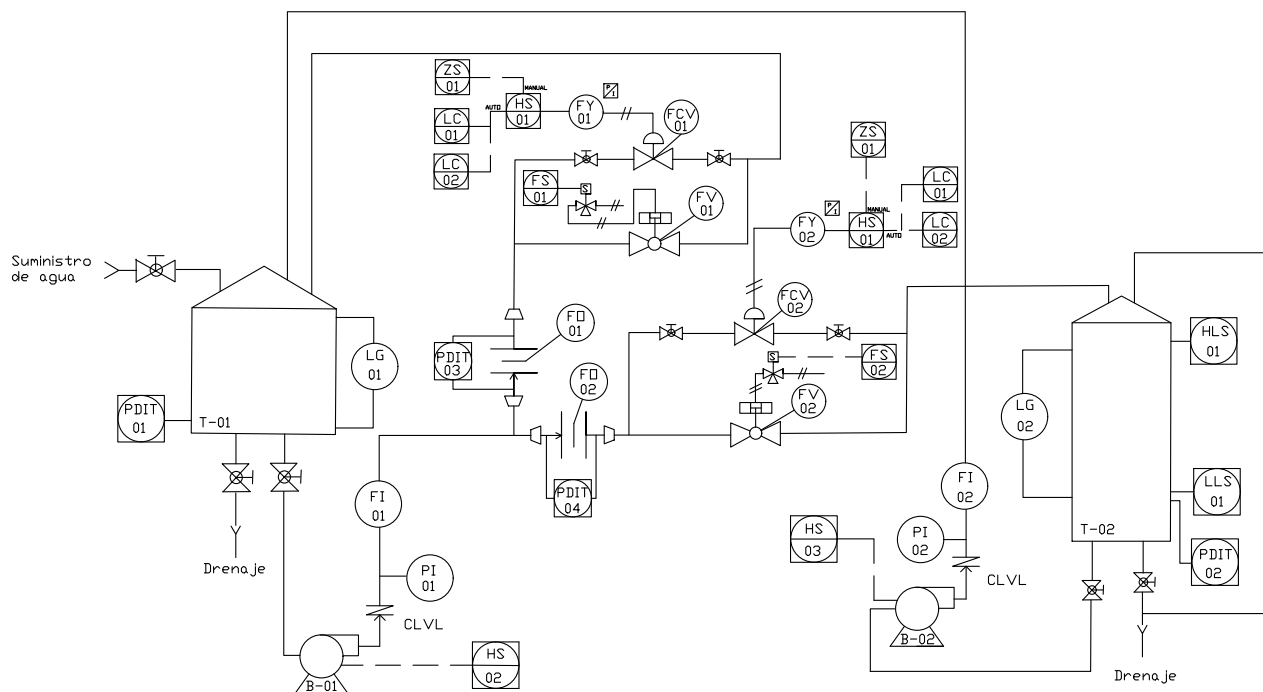
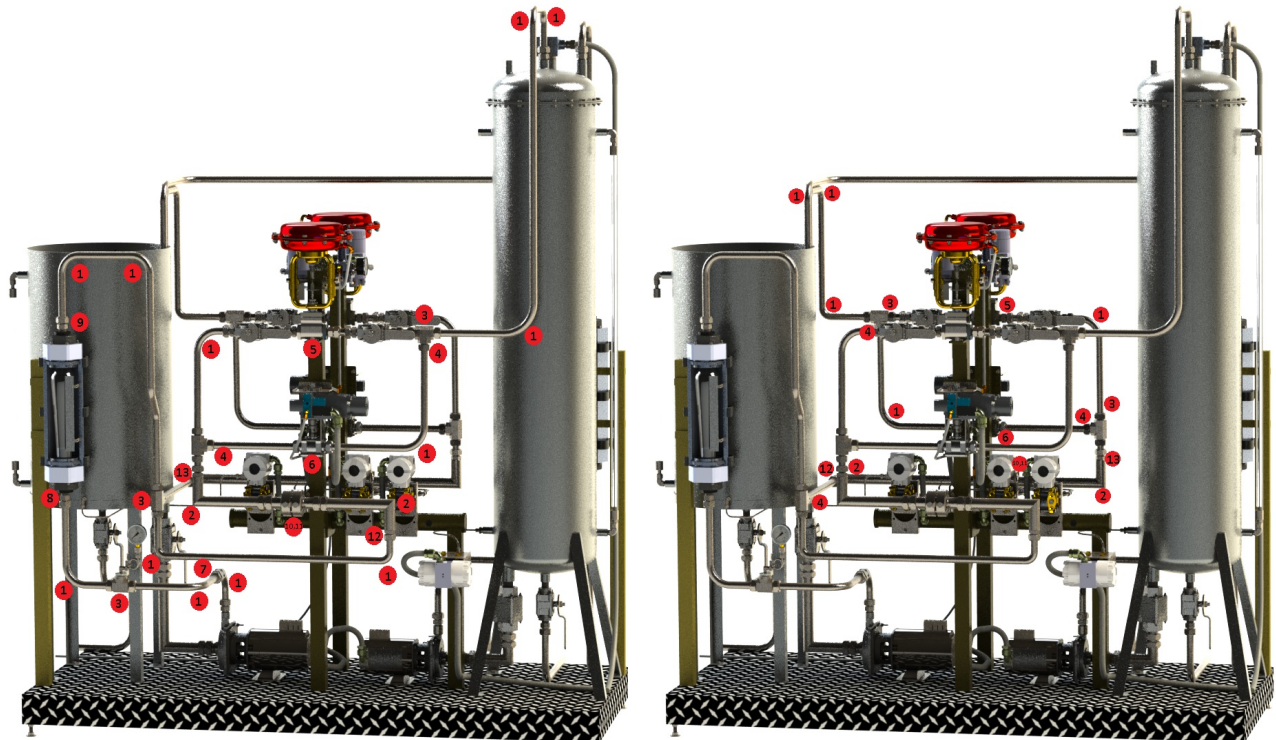


Figura 3.23 Diagrama de tuberías e instrumentación

3.2.1. Dinámica de los componentes hidráulicos

Se va a bombear agua a temperatura ambiente desde un tanque atmosférico con toma en la parte inferior a otro tanque atmosférico con toma en la parte superior. El primer tanque presenta una altura de liquido variable pero maxima de 68.6 m, el segundo tanque es atmosférico y también presenta una altura de liquido variable pero maxima de X m. El liquido en cuestión se transporta a través de tubería de 1 pulgada de acero inoxidable comercial como se muestra en la Figura 3.2. El agua es impulsada por una combinación de motor y bomba con un 70 por ciento de eficiencia que consume 745.7 W o 1 hp de energía eléctrica para bombear el agua del tanque 1 al tanque 2 y una segunda bomba mas chica que consume 372.85 W o 1/2 hp de energía eléctrica para bombear el agua del tanque 2 al tanque 1.



(a) Pérdida de carga en componentes de transferencia (b) Pérdida de carga en componentes de recirculación

Figura 3.24 Puntos de pérdida de carga en componentes a lo largo del sistema de tubería
3.5

En la Figura 3.24a y en la tabla 3.5 se observan todos los puntos de pérdida de carga a lo largo de la tubería que serán tomados en cuenta al momento de calcular las perdidas de carga en la ecuación de balance de energía con base en los datos de pérdidas de carga por resistencia en [Yunus A. Cengel, 2014].

Tabla 3.5 Pérdidas de carga en componentes de conexión

Tipo de componente	Kl (Coeficiente de pérdidas)
1.- Codos suavizados a 90°	0.3
2.- Codos sin suavizar a 90°	1.1
3.- Conexiones en "T"flujo directo	0.2
4.- Conexiones en "T"flujo a 90°	1
5.- Válvula de globo totalmente abierta	10
6.- Válvula de corte totalmente abierta	0.05
7.- Válvula check	2
8.- Expansion gradual $d/D = 0.5489$	0.15
9.- Reducción gradual 60°	0.07
10.- Expansion repentina en placa de orificio	0.595
11.- Reducción repentina en placa de orificio	0.4
12.- Expansion repentina en tubería de 1 1/2in	0.35
13.- Reducción repentina en tubería de 1 1/2in	0.3

[Yunus A. Cengel, 2014] pp.377

3.24

Cálculo de pérdidas por expansión y reducción repentina

Expansion repentina en placa de orificio(Tipo de componente num.10)

$$K_l = \alpha \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 = 1.05 * \left(1 - \frac{18.67mm^2}{37.55mm^2}\right)^2 = 0.595 \quad (3.1)$$

Reducción repentina en placa de orificio(Tipo de componente num.11)

$$K_l = \frac{d^2}{D^2} = (18.67mm)^2 / (37.55mm)^2 = 0.4 \quad (3.2)$$

Expansion repentina en tubería de 1 1/2in(Tipo de componente num.12)

$$K_l = \alpha \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 = 1.05 * \left(1 - \frac{24.4mm^2}{37.55mm^2}\right)^2 = 0.35 \quad (3.3)$$

Reducción repentina en tubería de 1 1/2in(Tipo de componente num.13)

$$K_l = \frac{d^2}{D^2} = \frac{(24.4mm)^2}{(37.55mm)^2} = 0.3 \quad (3.4)$$

[Yunus A. Cengel, 2014] pp.377

Ecuación de balance de energía en línea de transferencia

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_{t1} + h_{bomb} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + Z_{t2} + h_{lt} \quad (3.5)$$

Se toma en cuenta que ambos tanques están abiertos a la atmósfera, y las pérdidas por velocidad son despreciables, la ecuación de energía para el volumen de control entre el tanque 1 y tanque 2 se simplifica de la siguiente manera:

$$h_{lt} = h_{bomb} - (Z_{t2} - Z_{t1}) \quad (3.6)$$

Donde:

- h_{bomb} - Altura útil suministrada por la bomba al fluido
- h_{lt} - Pérdidas de carga a lo largo de la línea de transferencia
- Z_{t1} - Altura del fluido en contacto con la atmósfera en el tanque 1
- Z_{t2} - Altura del fluido en contacto con la atmósfera en el tanque 2

Ecuación de balance de energía en línea de recirculación

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_{t1} + h_{bomb} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + Z_{t1} + h_{lr} \quad (3.7)$$

Se toma en cuenta que ambos tanques están abiertos a la atmósfera, y las pérdidas por velocidad son despreciables, la ecuación de energía para el volumen de control del tanque 1 se simplifica de la siguiente manera:

$$h_{lr} = h_{bomb} \quad (3.8)$$

Donde:

- h_{bomb} - Altura útil suministrada por la bomba al fluido
- h_{lr} - Pérdidas de carga a lo largo de la línea de recirculación
- Z_{t1} - Altura del fluido en contacto con la atmósfera en el tanque 1

De la ecuación de Darcy-Weisbach para obtener las pérdidas de carga a lo largo de la tubería y al considerar las pérdidas por componentes conectados a la tubería, tenemos:

$$h_l = \left(f \frac{L}{D} + \Sigma K_l\right) \frac{V^2}{2g} \quad (3.9)$$

Donde la suma de los coeficientes de pérdidas en los componentes en la línea de transferencia se obtiene de la sección 3.24 y 3.5.

Mediante el análisis de pérdidas a lo largo de la línea de transferencia y recirculación se pueden observar 7 pérdidas diferentes, una antes de la bifurcación (común para la línea de transferencia y recirculación), otras dos enseguida de la bifurcación por lo que se tendrán dos ecuaciones de pérdidas de carga diferentes para cada bifurcación, enseguida continúa la bifurcación de las válvulas de transferencia

y recirculación, las cuales presentan diferente pérdida de acuerdo a la apertura de cada válvula. En este caso tendremos 4 pérdidas diferentes, por lo que en total se deben calcular 7 pérdidas a lo largo de toda la tubería, las cuales se muestran a continuación:

$$h_{lt} = h_{l1} + h_{l3} + h_{l6} \quad (3.10)$$

$$h_{lr} = h_{l1} + h_{l2} + h_{l4} \quad (3.11)$$

$$h_{l1} = (f_1 \frac{L_1}{D_1} + \Sigma K_{l1}) \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.12)$$

$$h_{l2} = (f_2 \frac{L_2}{D_2} + \Sigma K_{l2}) \frac{V_2^2}{2(9.81m/s^2)} \quad (3.13)$$

$$h_{l3} = (f_3 \frac{L_3}{D_3} + \Sigma K_{l3}) \frac{V_3^2}{2(9.81m/s^2)} \quad (3.14)$$

$$h_{l4} = (f_4 \frac{L_4}{D_4} + \Sigma K_{l4}) \frac{V_4^2}{2(9.81m/s^2)} \quad (3.15)$$

$$h_{l5} = (f_5 \frac{L_5}{D_5} + \Sigma K_{l5}) \frac{V_5^2}{2(9.81m/s^2)} \quad (3.16)$$

$$h_{l6} = (f_6 \frac{L_6}{D_6} + \Sigma K_{l6}) \frac{V_6^2}{2(9.81m/s^2)} \quad (3.17)$$

$$h_{l7} = (f_7 \frac{L_7}{D_7} + \Sigma K_{l7}) \frac{V_7^2}{2(9.81m/s^2)} \quad (3.18)$$

Debido a que las válvulas de recirculación se encuentran conectadas en paralelo, comparten misma entrada y misma salida, por lo que las pérdidas tendrán la misma magnitud en ambas líneas, con esto se obtienen las siguientes relaciones entre pérdidas de acuerdo con [Yunus A. Cengel, 2014] pp.385:

$$h_{l4} = h_{l5} \quad (3.19)$$

$$h_{l6} = h_{l7} \quad (3.20)$$

Para calcular el caudal en cada sección de perdidas se utiliza la ecuación fundamental de la velocidad del fluido respecto al caudal(Q) y el área transversal de la tubería(A):

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{Q_1}{\frac{\pi(D_1)^2}{4}} = \frac{Q_1}{\frac{\pi(0.0244m)^2}{4}} = \frac{Q_1}{4.676x10^{-4}m^2} \quad (3.21)$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{\frac{\pi(D_2)^2}{4}} \quad (3.22)$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{\frac{\pi(D_3)^2}{4}} \quad (3.23)$$

$$V_4 = \frac{Q_4}{\frac{\pi(D_4)^2}{4}} \quad (3.24)$$

$$V_5 = \frac{Q_5}{\frac{\pi(D_5)^2}{4}} \quad (3.25)$$

$$V_6 = \frac{Q_6}{\frac{\pi(D_6)^2}{4}} \quad (3.26)$$

$$V_7 = \frac{Q_7}{\frac{\pi(D_7)^2}{4}} \quad (3.27)$$

La altura útil suministrada por la bomba al fluido se determina a partir de la ecuación de potencia eléctrica de una bomba, la cual considera la densidad del fluido, el caudal de entrada a la bomba y la gravedad:

$$W_{elect} = \frac{\rho Q g h_{bomba}}{\eta_{bomba-motor}} \quad (3.28)$$

$$745.7w = \frac{(998kg/m^3)Q_1(9.81m/s^2)h_{bomba}}{0.7} \quad (3.29)$$

Para el cálculo del numero de Reynolds se utilizó la ecuación fundamental que considera la velocidad(V), densidad(ρ), viscosidad dinámica del fluido(μ), y diámetro de la tubería(D). Entre mayor sea este numero, mayor fricción existirá dentro de la tubería debido a un mayor choque entre partículas del fluido:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(999.7kg/m^3)VD}{1.307 \times 10^{-3}kg/ms} \quad (3.30)$$

Como el flujo predominante dentro de la tubería de pequeño diámetro será turbulento, la ecuación de Colebrooke es la adecuada para obtener el factor de fricción en la tubería, la cual considera el factor de rugosidad de la tubería, en este caso de acero inoxidable($\varepsilon = 0.000045$ m), diámetro(D) y el numero de Reynolds(Re):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (3.31)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{0.000045m}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (3.32)$$

Debido a que el factor de fricción depende del diámetro de apertura de las válvulas, se realiza el calculo para cada tramo de pérdidas en todo el sistema, lo que resulta en 7 tramos de diferente factor de fricción($f_1 - > f_7$), sin embargo, debido a que la tubería es de diámetro pequeño, el flujo dentro de ella siempre será turbulento debido a la velocidad del fluido, por ende el factor de fricción se puede considerar constante([Claudio, 1982]pp.208) a lo largo de la tubería después de la bomba centrífuga, por lo que el número de ecuaciones que describen el comportamiento del sistema se reduce considerablemente.

3.2.2. Modelo completo

Las ecuaciones antes mencionadas describen el comportamiento general de la planta hidráulica; consideran todo tipo de pérdidas, lo que resulta en un total de 22 ecuaciones no lineales que deben ser resueltas de manera simultanea:

1. h_{bomb} en términos del caudal de la linea común del sistema(Q_1) Ec. 3.29
2. V_1 en términos del caudal Q_1 Ec. 3.21
3. V_2 en términos del caudal Q_2 Ec. 3.22
4. V_3 en términos del caudal Q_3 Ec. 3.23
5. V_4 en términos del caudal Q_4 Ec. 3.24
6. V_5 en términos del caudal Q_5 Ec. 3.25
7. V_6 en términos del caudal Q_6 Ec. 3.26
8. V_7 en términos del caudal Q_7 Ec. 3.27
9. h_{l1} en términos de la velocidad V_1 Ec. 3.12
10. h_{l2} en términos de la velocidad V_2 Ec. 3.13
11. h_{l3} en términos de la velocidad V_3 Ec. 3.14
12. h_{l4} en términos de la velocidad V_4 Ec. 3.15
13. h_{l5} en términos de la velocidad V_5 Ec. 3.16
14. h_{l6} en términos de la velocidad V_6 Ec. 3.17
15. h_{l7} en términos de la velocidad V_7 Ec. 3.18
16. $h_{l4} = h_{l5}$ Ec. 3.19
17. $h_{l6} = h_{l7}$ Ec. 3.20
18. $h_{lt} = h_{bomb} - (Z_{t2} - Z_{t1})$ Ec. 3.6
19. $h_{lr} = h_{bomb}$ Ec. 3.8
20. $Q_1 = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7$
21. $h_{lt} = h_{l1} + h_{l3} + h_{l6}$
22. $h_{lr} = h_{l1} + h_{l2} + h_{l4}$

3.3. Implementación del modelo matemático

Al reducir el sistema de 22 ecuaciones y 22 incógnitas y tratar de resolver mediante el método numérico Newton-Raphson mejorado, dicho método requiere de condiciones iniciales para comenzar a buscar las raíces que cumplen con las ecuaciones, sin embargo, dichas condiciones iniciales deben ser muy próximas al resultado esperado para que el método converja de manera rápida, aun así no converge en cuestión de segundos y el resultado no es el que mejor cumple con todas las ecuaciones.

Debido a que el gemelo digital debe expresar en tiempo real lo que sucede en todo el sistema, dicho sistema de ecuaciones no es la solución optima a nuestro problema en tiempo real, por lo que de la literatura se tomó el modelo de tanque-bomba de [Janevska, 2013] y se adaptó a las características de distribución de nuestros tanques atmosféricos.

Dicho modelo describe el caudal proporcionado por una bomba de cierto tamaño conectada de una válvula de paso a su salida, por lo que fue adaptado para representar el efecto de la posición de los tanques respecto a la entrada de la bomba ya que la presión hidrostática del fluido almacenado

será en nuestro caso un factor que proporciona una presión hidrostática positiva a la entrada de la bomba, lo que favorece al caudal de salida. Dicho modelo se presenta a continuación:

3.3.1. Bomba Centrífuga

La siguiente implementación describe el comportamiento del fluido impulsado por la bomba de agua y proporciona un caudal acorde a una bomba real. Dentro de este modelo se consideran factores como el voltaje de suministro, frecuencia de suministro de energía, inercia del motor, así como diferentes pares de torsion derivados del efecto de fenómenos como la viscosidad del fluido, inercia, resistencia al movimiento, entre otros.

Tabla 3.6 Constantes de caracterización de bomba centrífuga de 1hp

Constante	Descripción	
$Kz = 0.00023$	Constante de ponderación de par viscoso (Nm s/rad)	
$Kp = 3.2$	Constante de ponderación de par resistivo	
$Kv = 0.00001$	Ponderación de apertura de la valvula	
$Kc = 190$	Constante del cambio de apertura en la valvula (m^6/s^2)	
$Kw = 0.1856$	Constante de ponderación de velocidad angular (Ns^2/m^2rad^2)	
$\rho = 997.1$	Densidad del liquido (Kg/m^3)	
$g = 9.8$	Aceleración de gravedad (m/s^2)	??
$hgv = 0.10$	Altura de la salida de la bomba a la base del tanque (m)	
$pb = 101325$	Presión atmosférica en pascales ($Kg/m * s^2$) = (N/m^2)	
$p2 = 108302$	Presión a la salida de la bomba en pascales	
$f = 60$	Frecuencia de suministro de energía al motor (Hz)	
$U = 110$	Voltaje de suministro al motor (V)	
$Kmt = 0.00000362$	Constante del torque activo que proporciona el motor	
$J = 0.03546$	Inercia del motor (kgm^2)	
$Kn = 40 * Kz$	Constante de ponderación de par viscoso	

Condición que evalúa la presión a través de la bomba con base en la presión de la columna de agua, la presión a la salida de la bomba y la presión que genera la velocidad de la bomba:

$$AA = (kw * W1^2 + \rho * g * hgv + pb - p2) \quad (3.33)$$

Calculo del caudal proporcionado por la bomba, calculado en [Janevska, 2013]

$$Q_{bom} = \frac{kv * Y}{\sqrt{1 + kc * (kv^2) * Y^2}} \sqrt{sign(AA) * AA} \quad (3.34)$$

Calculo del par resistivo de válvulas a la salida de la bomba:

$$MpY = \left(\frac{2}{1 + Y} - 1 \right) * Kn * W1 \quad (3.35)$$

Par resistivo que depende de la velocidad y caudal de la bomba:

$$Mp = kp * Qbom * W1 + MpY \quad (3.36)$$

Par viscoso o par debido a la fricción:

$$Mz = Kz * W1 \quad (3.37)$$

Par activo proporcionado por el motor:

$$Mmt = Kmot1 * Kmt * U^2 * (2 * pi * f - W1) \quad (3.38)$$

Ecuación de movimiento del conjunto motor-bomba:

$$\dot{W}1 = \frac{1}{J} * (Mmt - (Mp + Mz)) \quad (3.39)$$

Dichas constantes de ponderación fueron adaptadas de manera que los distintos tipos de pares resistivos así como la velocidad angular fueran acordes a los valores mínimos y máximos que una bomba real experimenta al bloquear y liberar su conducto de salida y con esto lograr un mejor cálculo del caudal que proporciona la bomba en las diferentes circunstancias.

3.3.2. Dinámica del nivel de fluido en un tanque

Mediante balance de masas para el tanque de techo abierto se sabe que la diferencia de caudal será el caudal de entrada(Q_e) menos el caudal de salida(Q_s), por lo que para obtener el diferencial de la altura respecto al tiempo(\dot{H}), se despeja la altura de la ecuación de volumen([Yunus A. Cengel, 2014]):

$$\Delta Q = Q_e - Q_s \quad (3.40)$$

$$\dot{V} = A\dot{H} \quad (3.41)$$

$$A\dot{H} = Q_e - k\sqrt{h(t)} \quad (3.42)$$

$$\dot{H} = \frac{1}{A}(Q_e - k\sqrt{h(t)}) \quad (3.43)$$

Donde $k\sqrt{h(t)}$ es el caudal de salida a través de un orificio con cierta apertura restringida. Al reescribir la ecuación en términos de la presión manométrica ejercida por la columna de líquido debido al efecto de gravedad, tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (3.44)$$

Al despejar la velocidad:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.45)$$

Al sustituir la ecuación 3.45 en 3.43:

$$\dot{H} = \frac{1}{A}(Qe - ka1\sqrt{2gh}) \quad (3.46)$$

Por último, al considerar los caudales de entrada y salida que afectan la altura del líquido dentro del tanque abierto, la ecuación 3.46 se reescribe de la siguiente manera:

$$\dot{H} = \frac{1}{A}(Qe - Qs) \quad (3.47)$$

A continuación se reúnen las distintas ecuaciones diferenciales utilizadas que describen la dinámica de la aceleración angular de cada una de las bombas centrífugas que depende de los pares de torsion generados por el motor eléctrico(par activo), los distintos pares resistivos debido a la fricción e inercia en los componentes del conjunto motor-bomba así como el par resistivo provocado por la estrangulación del paso del liquido en las válvulas de control de flujo.

$$\dot{W}1 = \frac{1}{J1} * (\underbrace{Mmt1}_{Kmot1*Kmt1*U^2*(2*pi*f-W1)} - (\underbrace{Mp1}_{Kp1*Qbom1*W1+MpY1} + \underbrace{Mz1}_{Mz1=Kz1*W1})) \quad (3.48)$$

$$\dot{W}2 = \frac{1}{J2} * (Mmt2 - (Mp2 + Mz2)) \quad (3.49)$$

De igual forma se muestran las ecuaciones diferenciales correspondientes a los tanques que describen la dinámica de la altura del líquido en el tanque y que dependen de su área, caudales de entrada y caudales de salida:

$$\dot{H}1 = \frac{1}{At1}(Qin1 - \underbrace{Qout1}_{ka1\sqrt{2gh1}}) \quad (3.50)$$

$$\dot{H}2 = \frac{1}{At2}(Qin2 - Qout2) \quad (3.51)$$

3.3.3. Continuidad de flujo aplicada a la bifurcación de la tubería

Debido a que el sistema presenta una bifurcación a diferente almacén, se debe analizar el sistema de fin a inicio ya que cada elemento que perturba la salida de cualquier extremidad de la bifurcación afectará directamente a la otra rama de la bifurcación, debido a dicho fenómeno se recurrió a la ayuda del análisis de continuidad de flujo en las bifurcaciones que presenta el sistema antes de cada válvula para lograr la representación del comportamiento del caudal antes de las cuatro válvulas equivalente al comportamiento que el fluido presentaría hipotéticamente a la salida de la bomba. Con este análisis es posible representar la apertura de las cuatro válvulas y representar la resistencia del caudal en la línea común del sistema(justo después de la salida de la bomba).

```

1  a = ApValGloboRec;    % de 0 a 1
2  b = ApValCorteRec;   % 0 o 1
3
4  c = ApValGloboTrans; % de 0 a 1
5  d = ApValCorteTrans; % 0 o 1
6
7  fab = a + b - a * b;   %Apertura total del sistema de valvulas en paralelo de recirculacion
8  fcd = c + d - c * d;   %Apertura total del sistema de valvulas en paralelo de transferencia
9
10 Y = fix(fab + fcd) + ((fab + fcd) * sign(1 - fcd)) * (1 - fix(fab + fcd)) - fix(fab) * fix(fcd); %
    Ponderacion de la apertura total del sistema de las 4 valvulas en paralelo(0 -> 1)
11
12 FQres = sign(fcd) * (fab * (1 - fcd/2)) + sign(fab) - sign(fab * fcd) * (sign(fcd) * (fab * (1 -
    fcd/2)) + 1/2); %Factor(0,1,1/2) que determina el caudal al inicio del sistema de
    recirculacion por continuidad de flujo
13
14 FQtrans = sign(fab) * (fcd * (1 - fab/2)) + sign(fcd) - sign(fcd * fab) * (sign(fab) * (fcd * (1 -
    fab/2)) + 1/2); %Factor(0,1,1/2) que determina el caudal al inicio del sistema de transferencia
    por continuidad de flujo

```

El análisis de continuidad de flujo se aplico en los siguientes tres casos:

1. Bifurcación secundaria conectada a las válvulas de control y de corte acopladas en paralelo, dicha bifurcación concluye después de las válvulas en la misma rama o línea del sistema(fab, fcd).
2. Bifurcación principal a la salida de la bomba de transferencia para representar y expresar una apertura de válvula imaginaria que engloba a las cuatro válvulas de nuestro sistema, esto es requerido para restringir y calcular el caudal que impulsa la bomba centrífuga, de este modo al tener toda válvula cerrada, se eleva el par resistivo, lo que representa que la bomba se encuentra restringida(Y).
3. Cálculo del factor que indica si el caudal de la bomba de transferencia se divide o se dirige completamente hacia una sola línea del sistema(transferencia o recirculación). Este factor es necesario ya que el caudal en cada línea del sistema(transferencia o recirculación) depende directamente del estado de apertura de la línea contraria(FQtrans, FQres).

Para lograr dicho análisis de continuidad de flujo se recurrió a dos funciones de Matlab que se describen a continuación: La Función "Fix"de Matlab nos permitió obtener la regla de correspondencia de manera mas simplificada ya que dicha función redondea el parámetro en cuestión al entero mas proximo a cero. Dicho de otra forma nos ayuda a truncar el parámetro en cuestión a numeros enteros

y así eliminar la parte decimal. Esto quiere decir que si el parámetro en cuestión tiene un valor de 0.9, el valor que regresa la función es 0.

La Función "Sign" de Matlab únicamente regresa tres valores (1, 0, -1) en caso de que el parámetro leído sea mayor a cero, la función retorna el valor de uno, en el caso de que el parámetro leído sea cero, la función retorna cero y en caso de que el parámetro leído sea menor a cero, la función retorna el valor de menos uno.

Dichas funciones presentan una lógica de tras que puede ser analizada y expresada en nuestro modelo, sin embargo, por cuestiones de simplicidad de las ecuaciones se recurrió a su uso.

3.3.4. Continuidad de flujo caso 1. Bifurcación secundaria

En cada bifurcación se pudo realizar el análisis de continuidad de flujo sin considerar alturas en la tubería ya que la diferencia de altura del líquido en cada línea del sistema (transferencia y recirculación) es considerado despreciable debido a que las condiciones de presión por altura del líquido son muy similares.

Dicho esto, para el caso de la bifurcación secundaria, el análisis es el mismo en cada línea del sistema (transferencia y recirculación) ya que presentan el mismo arreglo de válvulas, de las cuales, la apertura de una (válvula de globo) oscila de cero a uno y la apertura de la válvula de corte se restringe a los valores de cero o uno debido al tipo de accionamiento neumático acoplado. A continuación se presentan las relaciones de flujo a las que se llegó mediante dicho análisis para el caso de continuidad en la bifurcación secundaria.

Tabla 3.7 Correspondencia de flujo en bifurcación secundaria

Válvula de globo(a)	Válvula de corte(b)	Factor de apertura total(Fab)	Función que cumple
0	0	0	1
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	1,2
0.3	0	a	1
0.3	1	1	1,2

Función 1.

$$a + b \quad (3.52)$$

Función 2.

$$a * b \quad (3.53)$$

Función combinada:

$$Fab = a + b - a * b \quad (3.54)$$

3.3.5. Continuidad de flujo caso 2. Bifurcación principal

Para este caso, se calculó una apertura imaginaria de todo el sistema que afecta directamente a la bomba. Dicha apertura oscila entre cero y uno, no puede tener valor mayor a uno ya que significa que la bomba impulsa más caudal de lo que permite la tubería de acuerdo a las características de la bomba que fueron representadas en el modelo y son alteradas por la apertura imaginaria Y .

correspondiente a la bifurcación principal, el caudal a la salida de la línea de recirculación y de transferencia será la mitad del caudal principal, ya que el caudal a través de las válvulas es el mismo a la entrada que a la salida de la válvula por continuidad de flujo, esto al considerar las válvulas abiertas o parcialmente abiertas, dicha condición se cumple hasta que la diferencia de presiones en la válvula es considerablemente grande. De esta manera, como el caudal es el mismo a la entrada y salida de cada válvula, la única variable que se ve afectada es la velocidad del fluido ya que la presión de entrada es considerablemente alta debido al empuje de la bomba centrífuga.

En el caso en que una rama de la bifurcación principal se encuentre cerrada por completo, todo el caudal proveniente de la línea común será conducido hacia la segunda rama en caso de que esta se encuentre abierta, esto con base en el hecho de que el diámetro de la tubería común es igual al de cada bifurcación. En caso contrario, en que las dos bifurcaciones se encuentren totalmente abiertas, el flujo que proviene de la línea común no puede llegar a ser la suma de lo que puede fluir por cada rama ya que el diámetro de la tubería común no lo permite. La segunda razón por la que el flujo proveniente de la línea común no puede ser la suma de lo que puede fluir por cada rama es debido a que la segunda bifurcación concluye en una sola tubería del mismo diámetro que la línea común. A continuación se presentan las relaciones de flujo a las que se llegó mediante dicho análisis para el caso de continuidad en la bifurcación principal.

Tabla 3.8 Correspondencia de flujo en tubería común

Subsistema recirculación(F_{ab})	Subsistema transferencia(F_{cd})	Línea común(Y)	Función
0	0	0	1
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	1,3
0.5	1	1	1
0.5	0.5	1	1
1	0.5	1	1
0.3	0.8	1	1
0.5	0	0.5	2
0.3	0	0.3	2
0.3	0.5	0.8	2

Dichas relaciones se obtuvieron con base en el hecho de que en cada línea del sistema, la combinación de aperturas de las válvulas se verá reflejada en un rango de cero (cerrada) a uno (abierto).

Función 1.

$$fix(F_{ab} + F_{cd}) \quad (3.55)$$

Función 2.

$$((F_{ab} + F_{cd}) * sign(1 - F_{cd})) * (1 - fix(F_{ab} + F_{cd})) \quad (3.56)$$

Función 3.

$$fix(Fab) * fix(Fcd) \quad (3.57)$$

Función combinada:

$$Y = fix(Fab+Fcd)+((Fab+Fcd)*sign(1-Fcd))*(1-fix(Fab+Fcd))-fix(Fab)*fix(Fcd) \quad (3.58)$$

3.3.6. Continuidad de flujo caso 3. Factor de caudal dependiente

Para el tercer caso se requiere de un factor para el caudal principal que proviene directamente de la bomba de transferencia que representará el efecto de apertura de la línea contraria, esto quiere decir que el factor para cada línea será de 0,1 y 1/2.

Tabla 3.9 Factor de caudal dependiente

Subsistema recirculación(Fab)	Subsistema transferencia(Fcd)	Factor dependiente(FQres)	Función
0	0	0	2
0	1	0	1,2
0	0.8	0	2
1	0	1	2
1	1	1/2	1
0.3	0.3	1/2	3
0.3	0.5	1/2	3
0.5	0.5	1/2	3
0.8	0	1	2

Función 1.

$$sign(Fcd) * (Fab * (1 - Fcd/2)) \quad (3.59)$$

Función 2.

$$sign(Fab) \quad (3.60)$$

Función 3.

$$sign(Fab + Fcd) * (sign(Fcd) * (Fab * (1 - Fcd/2)) + 1/2) \quad (3.61)$$

Función combinada:

$$FQres = sign(Fcd)*(Fab*(1-Fcd/2))+sign(Fab)-sign(Fab+Fcd)*(sign(Fcd)*(Fab*(1-Fcd/2))+1/2) \quad (3.62)$$

3.3.7. Diagrama de bloques en Matlab/Simulink

A continuación podemos observar el diagrama de bloques realizado en Matlab/Simulink que representa a cada uno de los tanques, bombas centrífugas y válvulas en el sistema. Cada bloque representa un tanque con entradas y salidas de variables de salida de monitoreo que se ubican al centro del diagrama; las válvulas de corte que son representadas por un switch on/off que determinan la apertura en dos estados únicamente (totalmente abierta o totalmente cerrada) y las válvulas de control que son representadas mediante perillas que determinan la apertura en un rango de 0 a 1. Así mismo a los lados de cada bloque de tanque atmosférico se encuentran las válvulas secundarias como las válvulas de drenaje y válvula de suministro, ambas son válvulas de tipo globo por lo que oscilan en un rango de apertura de 0 a 1 y son representadas igualmente por perillas.

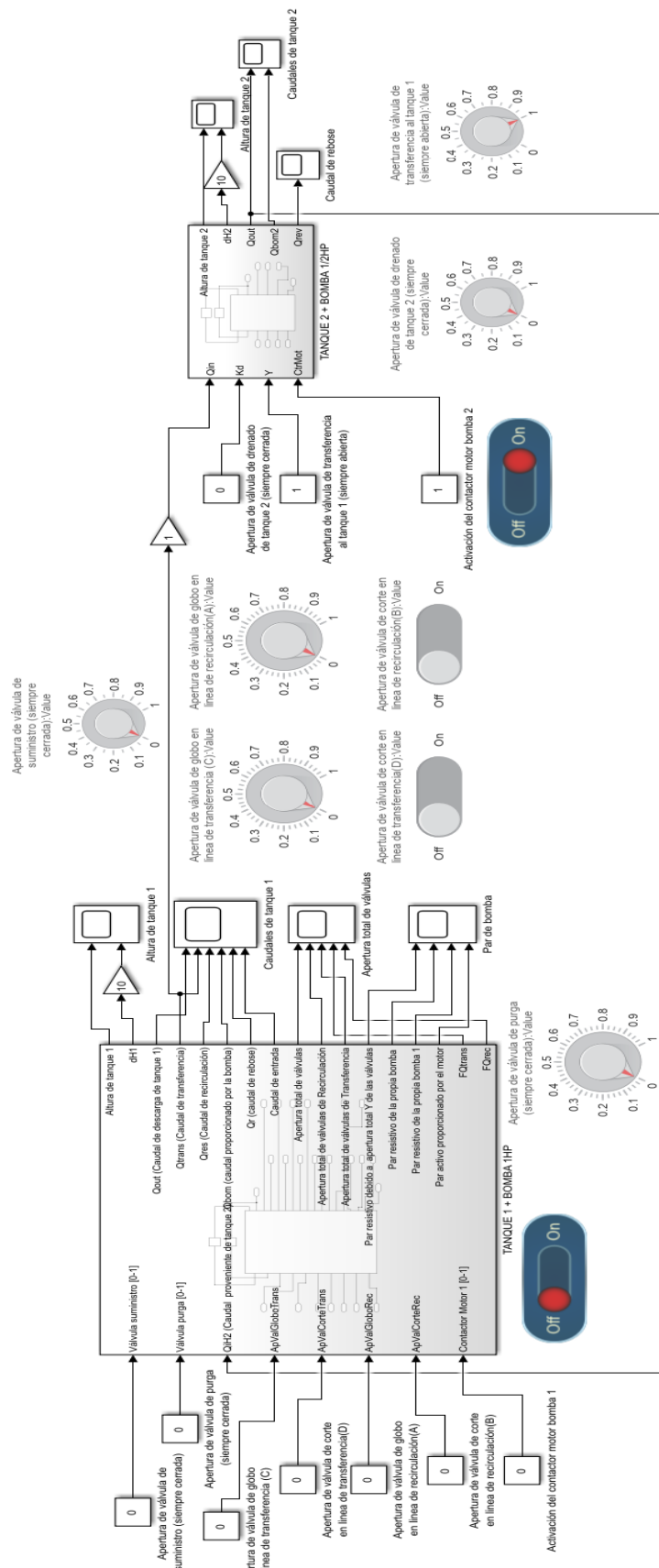


Figura 3.25 Diagrama de bloques Matlab/Simulink

Capítulo 4

Evaluación del gemelo digital

Para realizar la evaluación del gemelo digital se realizaron pruebas hipotéticas del llenado y vaciado de los tanques con diferentes combinaciones de aperturas de las cuatro válvulas. En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la evaluación del modelo matemático determinado en la sección 3.2 en las distintas pruebas de evaluación que se describen a continuación.

4.1. Pruebas de evaluación

4.1.1. Llenado del tanque de techo abierto mediante el grifo de suministro de agua

El tiempo de llenado del tanque es importante en caso de requerir el control del llenado, vaciado y/o transferencia de fluido entre tanques simultáneamente. Para ello se calculó el volumen de llenado del tanque de techo abierto en un determinado tiempo dado por el caudal de la manguera de suministro de agua. Las medidas que se tomaron en cuenta para dicha prueba fue la altura máxima del vidrio de nivel en el tanque(68.6 cm) así como el area de dicho tanque calculada a partir de su diámetro interno(50.512 cm) y el tiempo que tardo en llegar a dicho nivel(3 min 9.42 seg). Los cálculos del caudal proporcionado por la manguera de suministro son los siguientes:

$$Qi = \frac{V}{t} = \frac{0.1375m^3}{189.42s} = 0.000725 \frac{m^3}{s} = 725.734 \frac{cm^3}{s}$$

Al tomar en cuenta el caudal de entrada suministrado por la manguera de llenado en el modelado matemático en simulink se obtiene la gráfica de llenado donde se puede observar el tiempo en el que el tanque llegará a su máximo nivel que depende de la apertura de la válvula de drenado de dicho tanque.

En la Figura 4.1 se observa de la gráfica que la altura máxima del nivel del líquido es alcanzada hasta el segundo 190 aproximadamente, periodo que coincide con el tiempo que transcurrió durante la prueba física.

Llenado de tanque con apertura de válvula al 0% o cerrada:

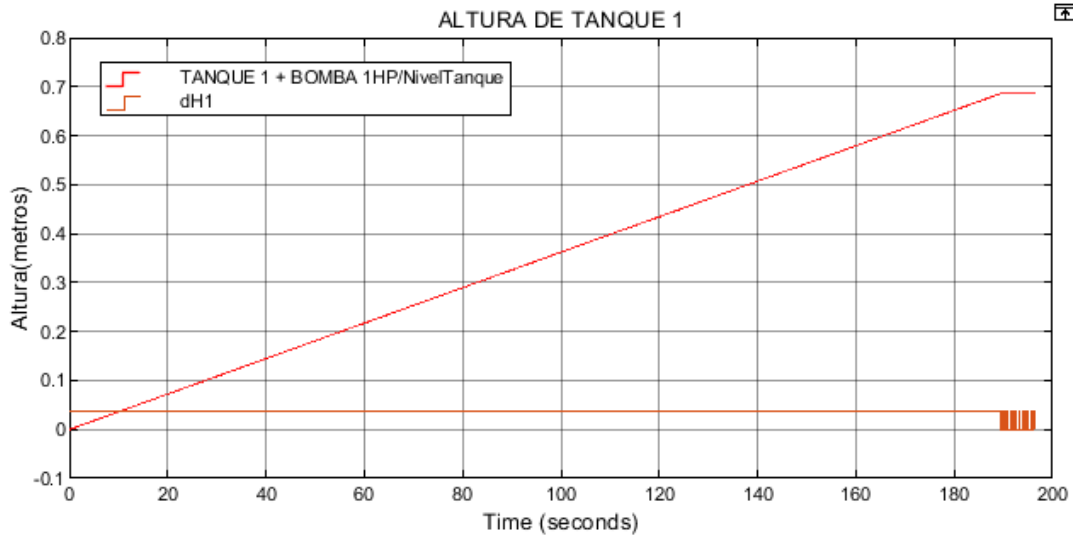


Figura 4.1 Llenado de tanque con válvula de drenado cerrada

En la Figura 4.2 se observa la simulación del llenado con una apertura del 50 % de la válvula de drenado del tanque, el cual llega a la altura máxima en un tiempo de aproximadamente de 405 segundos; al comparar con el tiempo donde la válvula se encuentra cerrada se puede observar que tarda un poco más del doble de tiempo.

Llenado de tanque con apertura de válvula de drenado al 50 %:

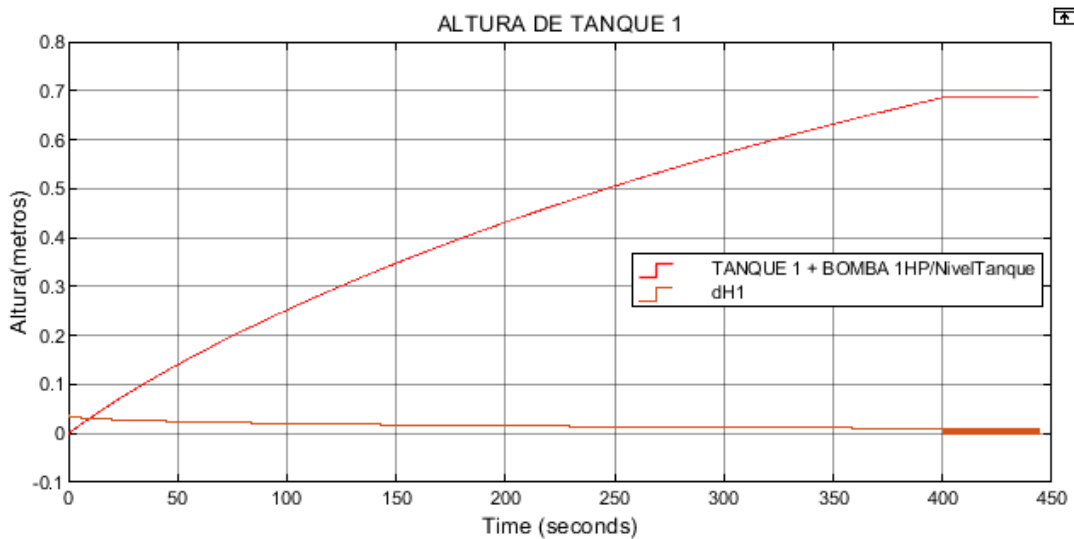


Figura 4.2 Llenado de tanque con apertura de válvula de drenado al 50 %

En la Figura 4.3 se observa la simulación del llenado del tanque de techo abierto con una apertura del 100 % de la válvula de drenado de dicho tanque, el cual no alcanza el nivel de líquido máximo debido a que el caudal de salida es igual al caudal de entrada a cierta altura de líquido gracias a la presión ejercida por el peso de la columna de líquido.

Llenado de tanque con apertura de válvula de drenado al 100 %:

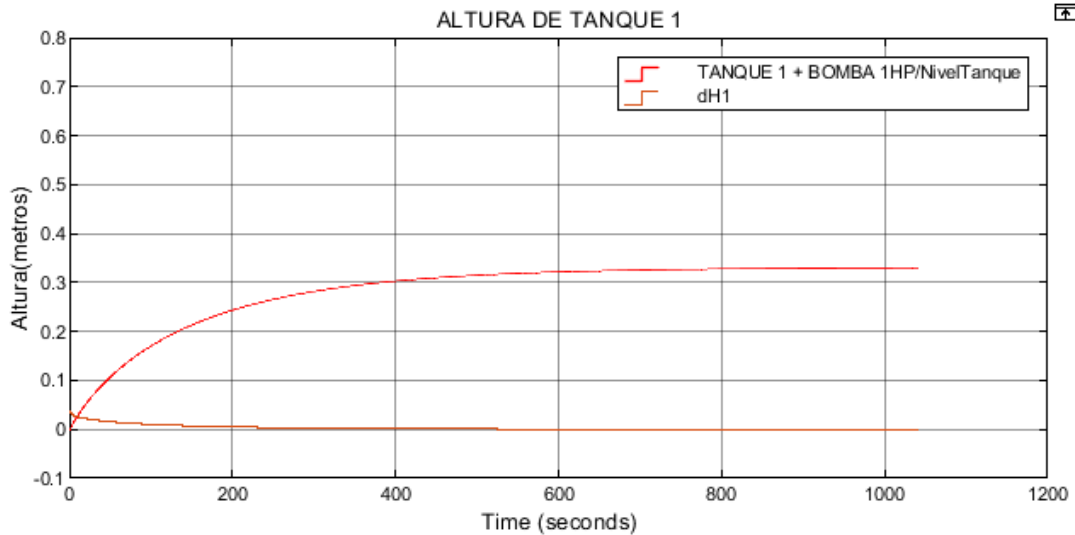


Figura 4.3 Llenado de tanque con apertura de válvula de drenado al 100 %

4.1.2. Descarga o purga del tanque de techo abierto

Es importante conocer este tiempo de vaciado en caso de requerir el control del llenado, vaciado y/o transferencia de fluido entre tanques simultáneamente. Para ello se calculó el volumen de llenado del tanque de techo abierto y se midió el tiempo que transcurre al descargar dicho tanque mediante la válvula de drenado, la cual determinará el caudal de vaciado del tanque junto con la velocidad de gravedad, ya que para este proceso no existe ningún tipo de bomba para extraer el líquido. Los cálculos del caudal a través de la válvula de drenado son los siguientes:

$$Q_o = \frac{V}{t} = \frac{0.1375m^3}{189.24s} = 0.0007266 \frac{m^3}{s} = 726.59 \frac{cm^3}{s}$$

Al tomar en cuenta únicamente el caudal de salida con el tanque lleno, el modelado matemático en Simulink se obtiene la gráfica de drenado donde se puede observar el tiempo en que el tanque llegará a su mínimo nivel, que depende de la apertura de la válvula de drenado de dicho tanque.

En la Figura 4.4 se observa de la gráfica que la altura mínima del nivel del líquido es alcanzada hasta el segundo 230 aproximadamente, periodo que coincide con el tiempo que transcurrió durante la prueba en el tanque real. Dicha medición nos lleva a calcular una velocidad de drenado de 17.9 cm por minuto, equivalentes a un caudal de drenado promedio de 35.8 litros por minuto, donde la gravedad sobre la columna del líquido fue la única variable física que intervino en dicho caudal de drenado.

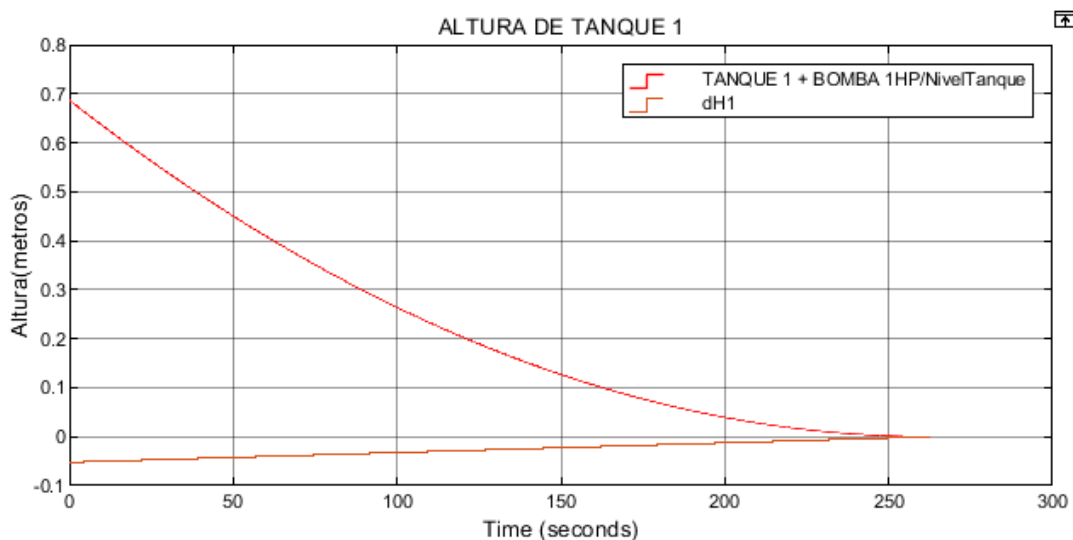


Figura 4.4 Drenado de tanque con apertura de válvula al 100 %

En la Figura 4.5 se muestra la simulación del drenado con una apertura del 50 % de la válvula de drenado del tanque 1 de techo abierto, el cual llega a la altura mínima en un tiempo de aproximadamente de 450 segundos y al comparar con el tiempo donde la válvula se encuentra totalmente abierta se puede observar que tarda el doble de tiempo. De esta manera se comprobó el comportamiento proporcional del caudal con respecto a la apertura que ofrecen este tipo de válvulas. La velocidad calculada de drenado para la apertura del 50 % de la válvula fue de 9.15 cm por minuto, equivalentes a un caudal de drenado promedio de 18.3 litros por minuto.

De ambas gráficas de nivel del tanque se observa la no linealidad provocada por la presión hidrostática de la columna de agua conforme disminuye el nivel del líquido.

4.1.3. Caudal máximo de transferencia de líquido del tanque abierto al tanque cerrado con apertura de válvulas de transferencia al 100 por ciento y válvulas de recirculación cerradas

El tiempo de transferencia del líquido nos ayudara a comprender y calcular el caudal total que fluye a través de la tubería con todas las válvulas abiertas y con esto conocer el caudal máximo de transferencia del tanque 1 de techo abierto al tanque 2 de techo cerrado con el propósito de controlar el llenado y vaciado de tanques simultáneamente. Dicho caudal dependerá tanto de la apertura de las válvulas como de la potencia de la bomba centrífuga instalada para transferir fluido. Para realizar dicho cálculo es necesario contar con el volumen del tanque de techo abierto, el cual presenta un diámetro interno de 50.512 cm y una altura máxima de nivel de líquido de 0.686 m; De igual forma es

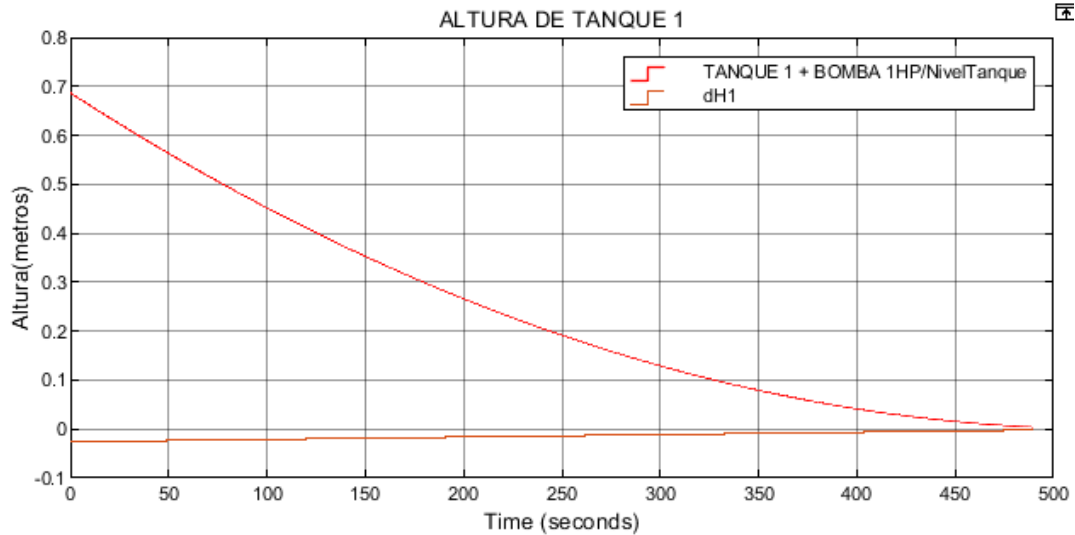


Figura 4.5 Drenado de tanque con apertura de válvula al 50 %

necesario contar con el tiempo que tarda en transferir todo el líquido al tanque 2 de techo cerrado. Al realizar los cálculos necesarios se obtiene el caudal de transferencia de la siguiente forma:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{A * h}{t} = \frac{\pi * ((0.50512m/2)^2 * 0.686m)}{t} = \frac{0.1375m^3}{t}$$

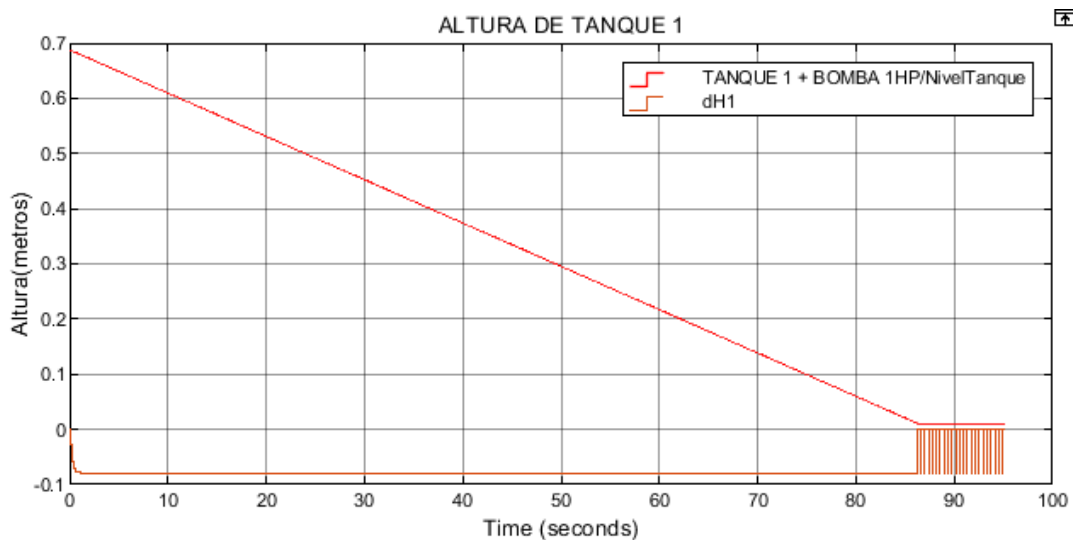


Figura 4.6 Transferencia del tanque abierto a tanque cerrado con válvulas de transferencia al 100 %

El tiempo transcurrido fue de alrededor de 86 segundos para transferir todo el volumen de líquido al tanque 2 de techo cerrado, dicho tiempo fue gracias al impulso de la bomba de 1 HP de potencia con las restricciones impuestas por la construcción del sistema de tubería y elementos de medición acoplados a ella. Al considerar la altura del líquido contra el tiempo de llenado, la velocidad de llenado fue de 0.686 m en 86 segundos lo que equivale a 47.86 cm de altura por minuto. El diámetro del

tanque es de 50.512 cm, que corresponde a un area de 0.2 metros cuadrados, por lo que el volumen correspondiente a la altura desplazada es igual a 0.096 metros cúbicos por minuto, equivalentes a 96 litros por minuto.

4.1.4. Caudal máximo de transferencia de líquido del tanque de techo cerrado al tanque de techo abierto

Esta transferencia de fluido ocurre solamente a través de una tubería de 1 pulgada de diámetro sin válvulas de ningún tipo acopladas a ella, por lo que el caudal que fluye depende únicamente del diámetro de la tubería y la potencia de la bomba centrífuga instalada.

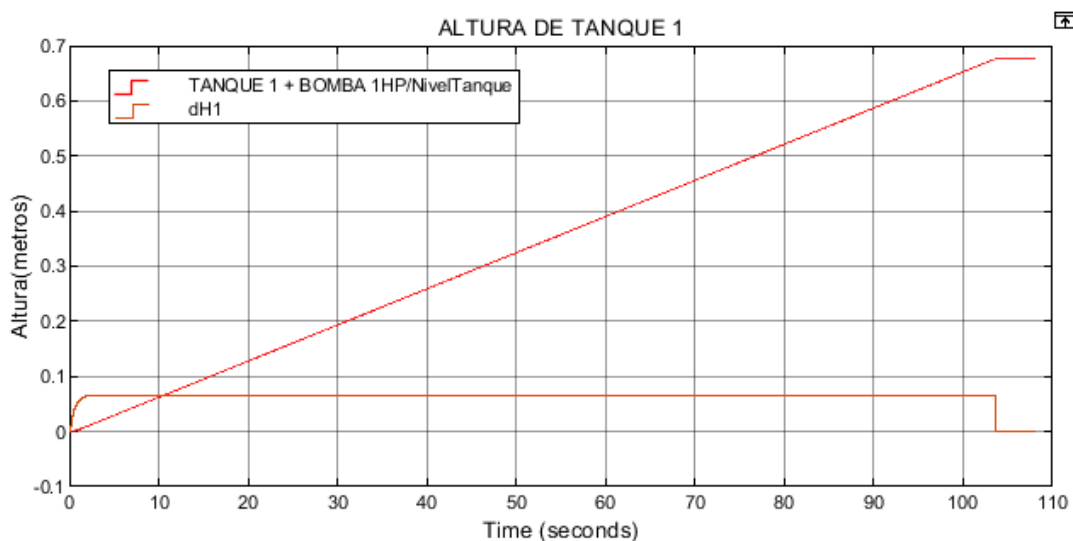


Figura 4.7 Transferencia del tanque cerrado a tanque abierto mediante bomba de 1/2 HP

El tiempo transcurrido fue de alrededor de 90 segundos para transferir todo el volumen de líquido correspondiente al volumen total del tanque 1 de techo abierto, dicho tiempo fue gracias al impulso de la bomba de 1/2 HP de potencia sin ningún tipo de restricción externa al sistema de tubería y elementos de medición acoplados a ella. Al considerar la altura del líquido contra el tiempo de llenado, la velocidad de llenado fue de 0.686 m en 90 segundos lo que equivale a 45.73 cm de altura por minuto. El volumen correspondiente a la altura desplazada es igual a 0.0916 metros cúbicos por minuto, equivalentes a 91.6 litros por minuto.

4.1.5. Transferencia de líquido del tanque abierto al tanque cerrado con suministro externo, desborde de tanque de techo cerrado, apertura de válvulas de transferencia al 100 por ciento y válvulas de recirculación cerradas

De igual forma, las condiciones iniciales de dicha prueba fueron las mismas que para la prueba anterior con la única diferencia de que en este caso las válvulas de recirculación se encuentran cerradas, por lo que el único suministro al tanque 1 de techo abierto es a través de la manguera de suministro.

De la gráfica se observa un tiempo de transferencia del líquido de 160 segundos lo que equivale a una

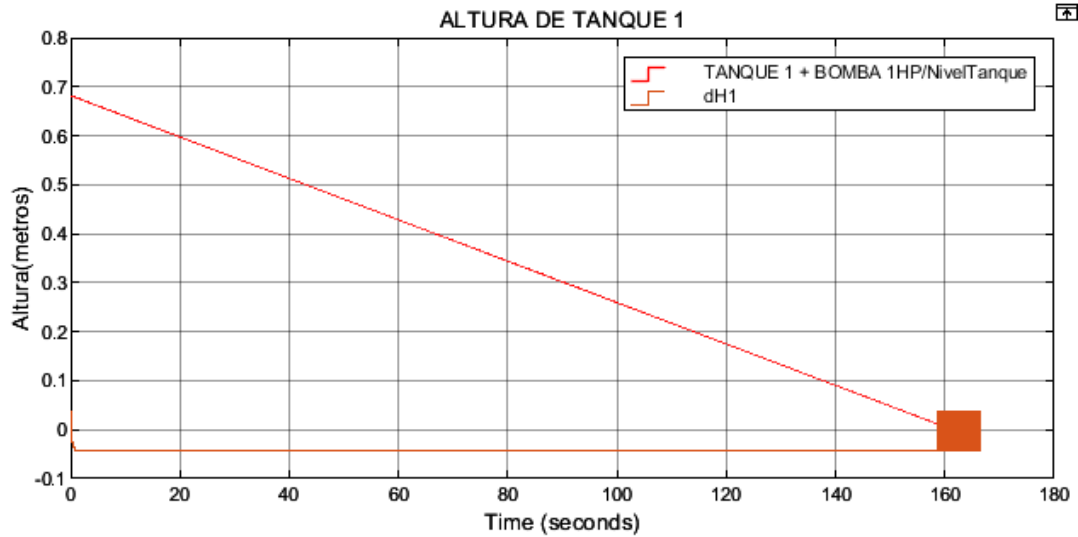


Figura 4.8 Transferencia del tanque abierto a tanque cerrado con caudal de suministro externo

velocidad de drenado del tanque 1 de techo abierto de 25.73 cm por minuto, equivalentes a un caudal de transferencia de 51.46 litros por minuto.

4.1.6. Transferencia de líquido del tanque abierto al tanque cerrado con apertura de toda válvula al 100 por ciento

Las condiciones iniciales para esta prueba fueron contar con el tanque de techo abierto a su nivel máximo de líquido, válvula de suministro totalmente cerrada así como la válvula de purga. Válvulas de recirculación y transferencia totalmente abiertas, de modo que existirá un flujo de retorno y un flujo de transferencia, lo que aumenta el tiempo de vaciado del tanque de techo abierto.

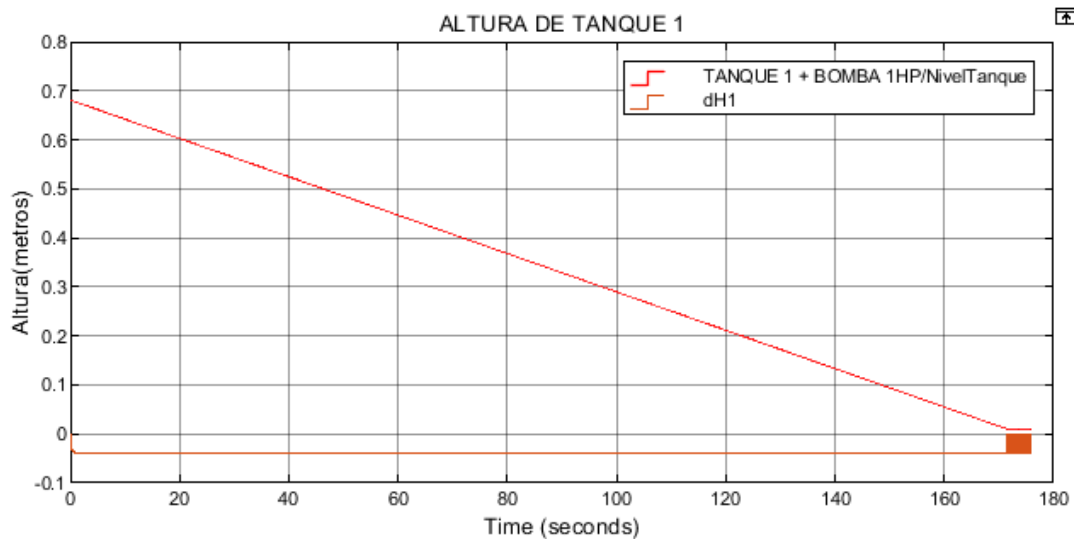


Figura 4.9 Transferencia del tanque abierto a tanque cerrado con apertura de válvulas al 100 %

De la Figura 4.9 se observa el tiempo transcurrido de vaciado alrededor de los 175 segundos, esto quiere decir que la velocidad de vaciado fue de 23.52 cm por minuto, equivalentes a un caudal de transferencia de 47.04 litros por minuto. Aunque existe una recirculación de aproximadamente del 50 % del caudal proporcionado por la bomba, dicha velocidad fue mayor a la velocidad de drenado mediante gravedad.

4.1.7. Transferencia de líquido del tanque abierto al tanque cerrado con apertura de toda válvula al 100 por ciento con suministro externo y desborde

Las condiciones iniciales de dicha prueba fueron las mismas que para la prueba anterior con la única diferencia de que en este caso la válvula de suministro presenta una apertura del 100 %, esto quiere decir que existirá un caudal constante y conocido de entrada al tanque 1 de techo abierto que reduce la velocidad de drenado del líquido y que por ser menor al caudal de transferencia proporcionado por la bomba se podrá llegar al vaciado completo del tanque y el desborde del tanque 2 de techo cerrado.

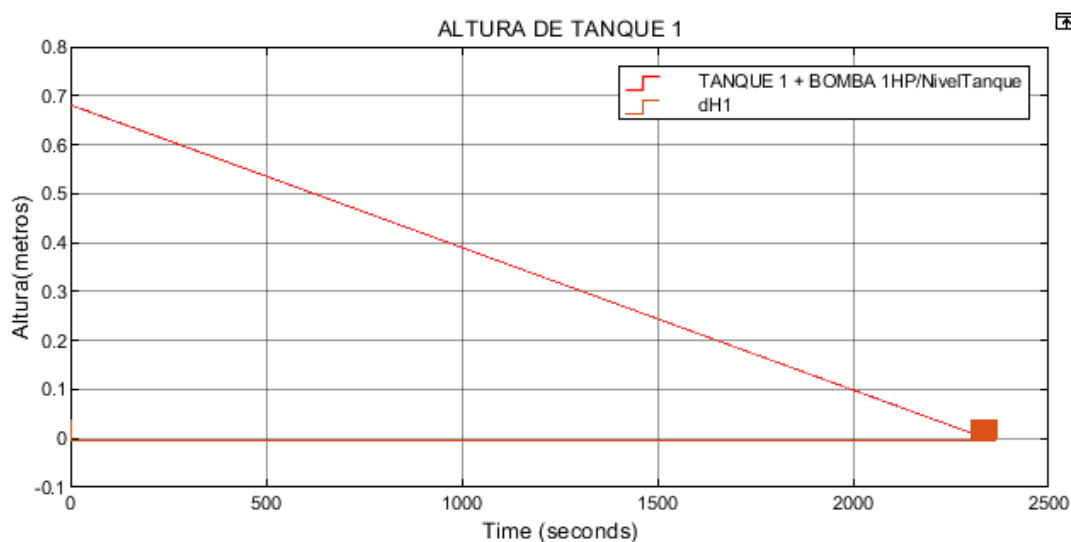


Figura 4.10 Transferencia del tanque abierto a tanque cerrado con apertura de válvulas y suministro externo al 100 %

De la gráfica se obtuvo un tiempo de transferencia del líquido de alrededor de 2350 segundos, lo que equivale a una velocidad de drenado del tanque 1 de techo abierto de 1.75 cm por minuto o un caudal de drenado de 3.5 litros por minuto, menor al caudal de transferencia, que en este caso sería el mismo que en la prueba pasada de 47.04 litros por minuto.

4.1.8. Nivel de líquido invariable con ambas bombas encendidas, válvulas de transferencia abiertas al 100 por ciento y válvulas de recirculación cerradas

Para esta prueba se requiere de obtener la apertura de la válvula de globo de transferencia para la cual se logre que ninguno de los dos tanques suba o baje de nivel. Esto quiere decir que de la ecuación diferencial de la altura del tanque, el diferencial de altura tiene que llegar al valor de cero en ambos tanques, con esto se comprueba que el modelo matemático cumple con las características necesarias

de conservación de la masa. De este modo, el volumen de agua se mantiene durante el cálculo cuando no existe algún tipo de suministro o drenado del líquido.

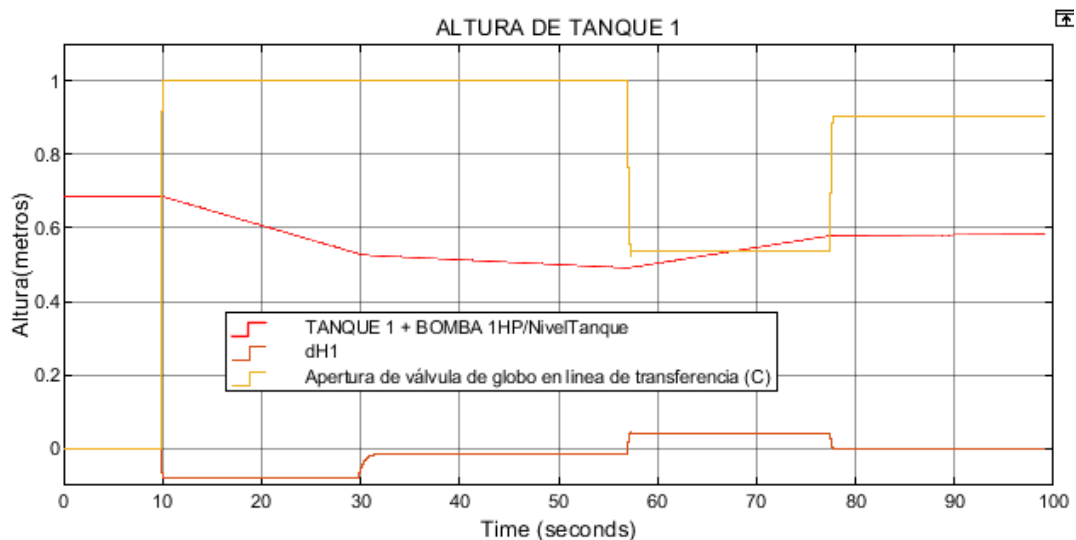


Figura 4.11 Transferencia entre tanques con válvulas de recirculación cerradas

Debido a la facilidad con la que el fluido retorna del tanque 2 de techo cerrado al tanque 1 de techo abierto, la apertura de las válvulas de transferencia tienen mucha influencia sobre el punto donde el nivel es invariable, ya que una ligera modificación a la apertura de dichas válvulas altera de manera significativa la cantidad de caudal por pérdidas secundarias en la tubería.

4.2. Discusión de los resultados

El análisis de redes de tuberías es muy similar al análisis de circuitos eléctricos (leyes de Kirchhoff), con caudal que corresponde a la corriente eléctrica y presión que corresponde al potencial eléctrico. Sin embargo, la situación aquí es mucho más compleja ya que, a diferencia de la resistencia eléctrica, la resistencia al flujo es una función altamente no lineal. Por lo tanto, el análisis de redes de tuberías requiere la solución simultánea de un sistema de ecuaciones no lineales. En nuestro caso obtuvimos resultados muy aproximados a las pruebas realizadas en el modelo físico con ayuda del análisis de continuidad de flujo realizado en cada bifurcación, a continuación se detallan algunos puntos de interés sobre las pruebas realizadas.

-Caudal máximo de transferencia de líquido del tanque de techo cerrado al tanque de techo abierto: La comparación del caudal de la Figura 4.7 con las especificaciones técnicas de una bomba de 1/2 hp (caudal máximo de 90 litros por minuto), nos indica que el modelo matemático de la bomba centrífuga de 1/2 hp es el esperado. De igual forma se compararon tiempos de vaciado/llenado de los tanques, los cuales corresponden a los tiempos transcurridos en las pruebas físicas.

-Transferencia de líquido del tanque abierto al tanque cerrado con apertura de toda válvula al 100 por ciento:

Aunque existe una recirculación de aproximadamente del 50% del caudal proporcionado por la bomba, la velocidad de drenado del tanque de techo abierto fue mayor a la velocidad de drenado mediante gravedad (Figura 4.9).

-Nivel de líquido invariable con ambas bombas encendidas, válvulas de transferencia abiertas al 100 por ciento y válvulas de recirculación cerradas:

De la Figura 4.11 se observa que el nivel del líquido en ambos tanques es invariable cuando se tiene una apertura de la válvula de transferencia muy cercana al 90 por ciento de su apertura total lo que nos muestra que aunque la bomba de 1 hp es del doble de potencia que la bomba de recirculación, alrededor del 40 por ciento de potencia de la bomba de 1 hp se disipa o se destina a las pérdidas primarias y secundarias del propio sistema.

Con base en los resultados obtenidos y la comparación con las pruebas en el modelo físico se puede concluir que los datos calculados por el modelo matemático propuesto son confiables para poder simular pruebas de llenado/vaciado de ambos tanques atmosféricos.

Capítulo 5

Conclusiones

El planteamiento de un sistema de ecuaciones o modelo matemático de un sistema de tuberías se puede abordar de diferentes ángulos y perspectivas, lo que va a depender de la complejidad, dimensiones y distribución del sistema. Al tratarse de una red de tuberías, existe una gran cantidad de puntos donde existen pérdidas de caudal que al considerar cada una, el modelado crece en gran medida en cuanto a ecuaciones que describen cada tipo de pérdida, por lo que se forma un sistema no lineal de ecuaciones simultáneas cuya solución directa del sistema no es posible. Para esto se han desarrollado métodos numéricos para obtener la solución al sistema mediante procedimientos iterativos que para nuestro caso no son factibles por dos razones, la primera es un tiempo de cálculo grande y la segunda es debido a que las variables finales que nos interesan son las velocidades de llenado de cada tanque atmosférico y que pueden ser calculadas al reunir todas las pérdidas en la tubería sin necesidad de calcularlas todas y cada una de ellas.

La propuesta de solución final fue el modelo de bomba centrífuga y tanque atmosférico con análisis de continuidad de flujo en las bifurcaciones, dicha solución considera las características técnicas de cada tanque atmosférico y de cada bomba centrífuga de tamaño dado, con ello se obtiene el caudal proporcionado por una bomba centrífuga real y así lograr una mejor aproximación a los resultados esperados de caudal de transferencia como de recirculación.

Se logró cumplir con una característica primordial de un gemelo digital predictivo que es la capacidad de evaluar el modelo matemático en tiempo real ya que no hay cabida para destinar un mayor tiempo de cálculo que el tiempo de reacción del sistema, por lo que los tiempos de cálculo fueron el pilar y el punto de inflexión para la toma de decisión del método a utilizar para la resolución del sistema. La solución mediante bloques de subsistemas en Simulink permitió contar con la capacidad de cálculo en un tiempo que no supera el tiempo de reacción del sistema físico gracias a que la complejidad del modelo en cada subsistema no exige gran procesamiento por parte del procesador del ordenador.

De los resultados de la evaluación del modelo matemático se vislumbra que las variables de comportamiento de cada bomba como los diferentes pares de torsión calculados con base en las condiciones del sistema nos brindan información sobre el estado y exigencia de las bombas centrífugas y nos dan una idea sobre sus límites de operación, lo que nos ayuda a programar alarmas de sobre-exigencia y así advertir al operador sobre las variables de control ingresadas a los elementos de control de flujo.

Con la implementación del modelo matemático y el desarrollo del diseño paramétrico 3D se obtuvo una herramienta de software centralizada, eficaz y reproducible en la que cada operador puede experimentar en su propio ordenador y con ello acelerar la obtención de conocimiento. Al mismo

tiempo los alumnos pueden identificar y clasificar oportunidades de optimización del control del proceso estudiado y así acentuar el hecho de respaldar la toma de decisiones sin desperdiciar recursos valiosos.

5.1. Trabajo a futuro

- Aumentar el detalle interno del modelo paramétrico de ciertos componentes más comunes como lo son las válvulas neumáticas, válvulas de purga de aire, bombas de agua(propela, embobinado, ejes, etc).
- Realizar la implementación del *Digital twin environment* con ayuda del software Emulpro que permita la integración del modelo paramétrico 3D con el modelo matemático mediante una interfaz gráfica de la planta hidráulica donde se visualice de manera más directa el proceso en el gemelo virtual.
- Modificar el modelo de bomba hidráulica bifásica para representar las nuevas bombas trifásicas controladas por medio de variadores de frecuencia.
- Evaluar la mejora del modelado matemático de manera que las ecuaciones obtenidas mediante continuidad de flujo en las bifurcaciones se simplifiquen y sea más flexible y robusto el modelo matemático al realizar modificaciones al sistema de tuberías.

Apéndice A

Planos de ensamble de los componentes del sistema de control de caudal de la planta hidráulica

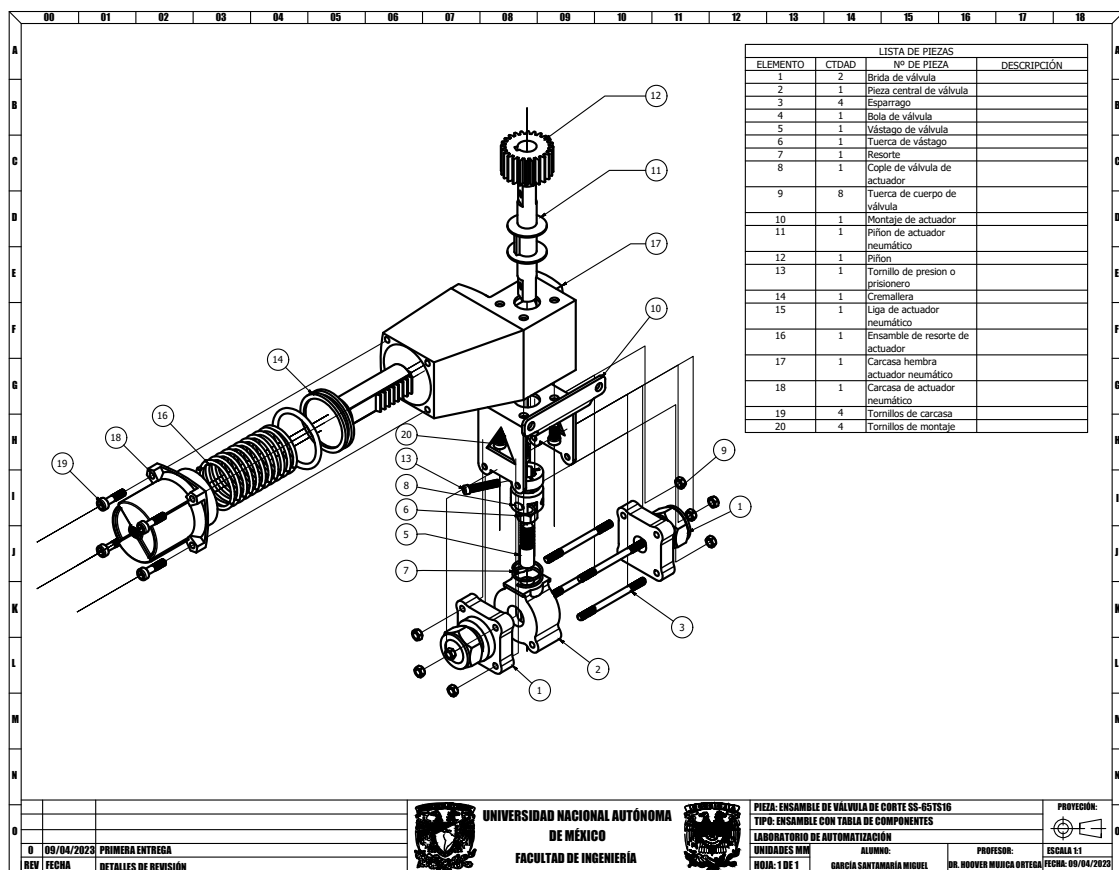


Figura A.1 Ensamble explosionado y tabla de componentes de válvula de corte Swagelok SS-65TS16 con actuador neumático

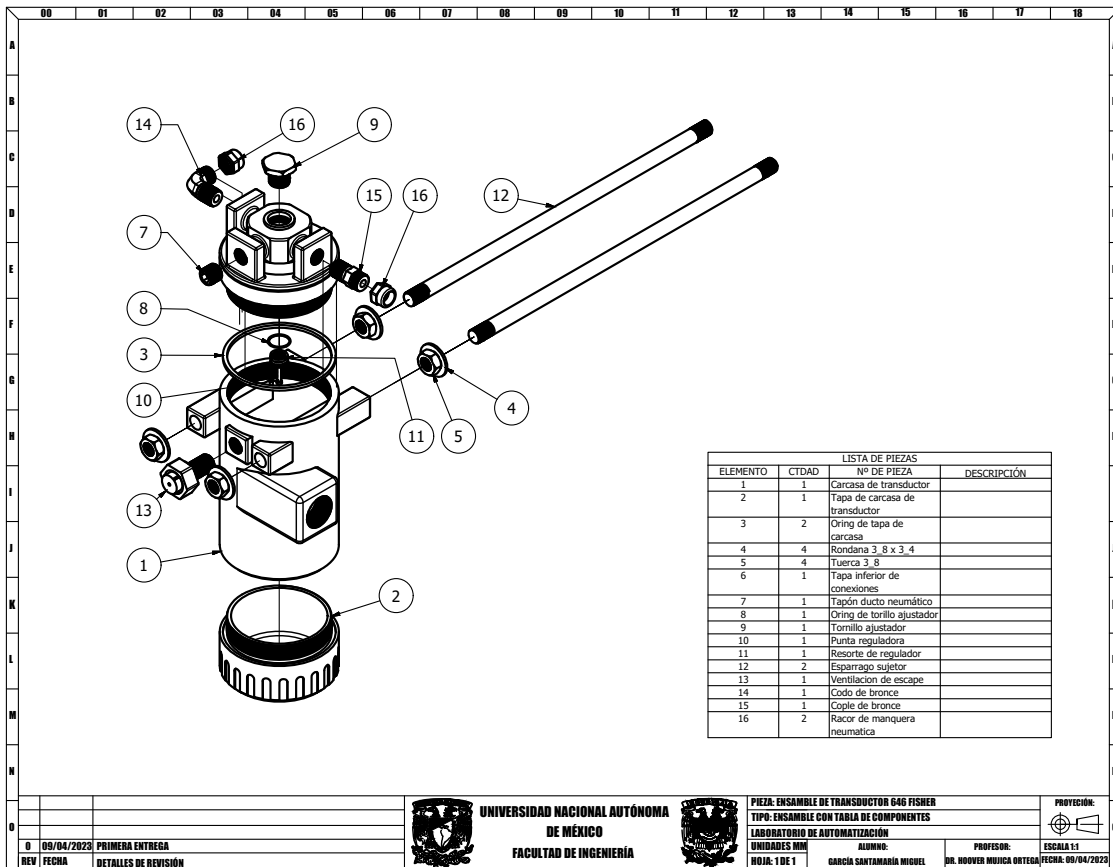


Figura A.2 Ensamble explosionado y tabla de componentes de transductor 646 Fisher

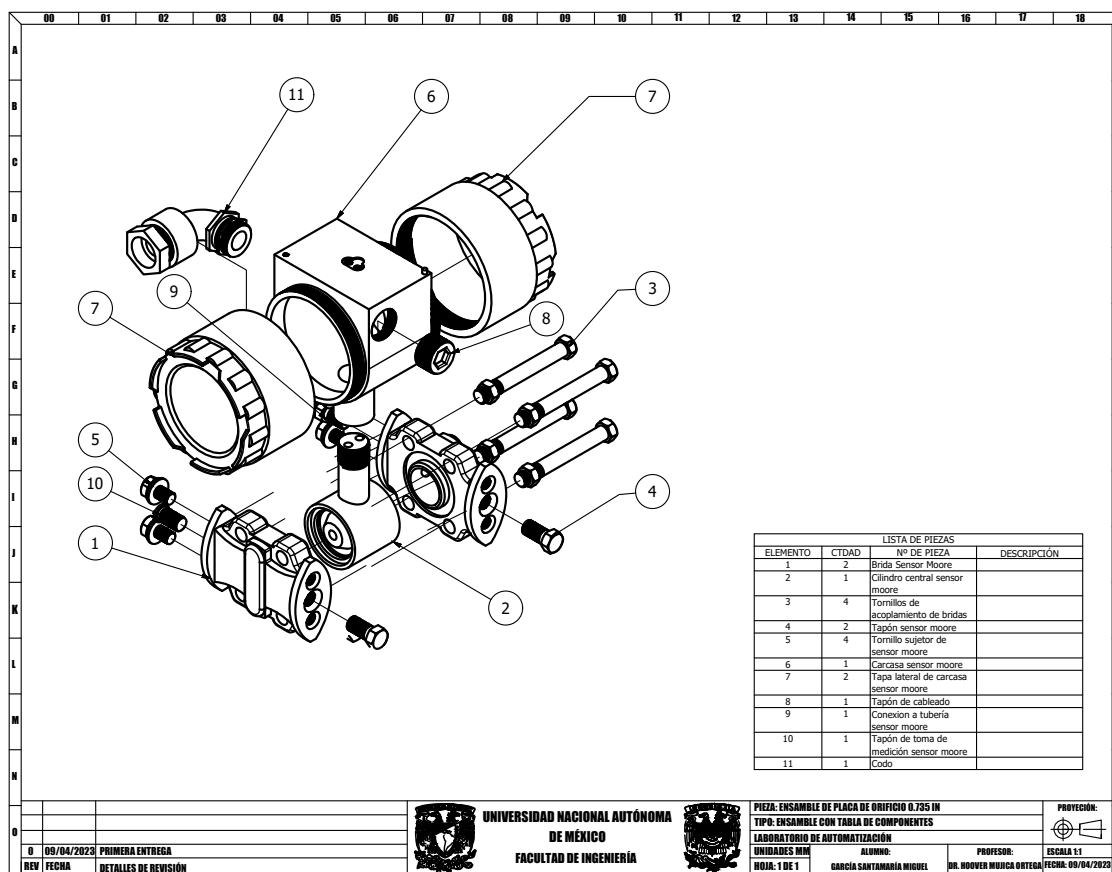


Figura A.3 Ensamble explosionado y tabla de componentes de sensor de presión diferencial moore

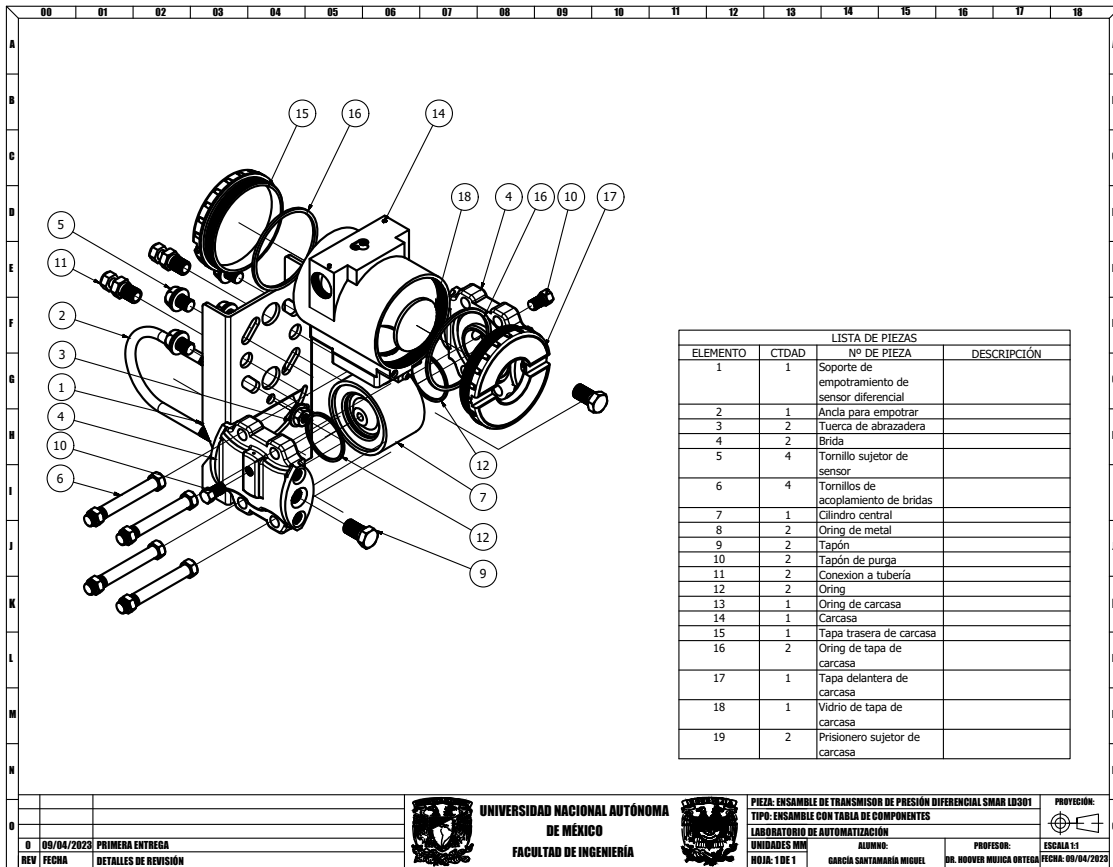


Figura A.4 Ensamble explosionado y tabla de componentes de sensor de presión diferencial SMAR LD301

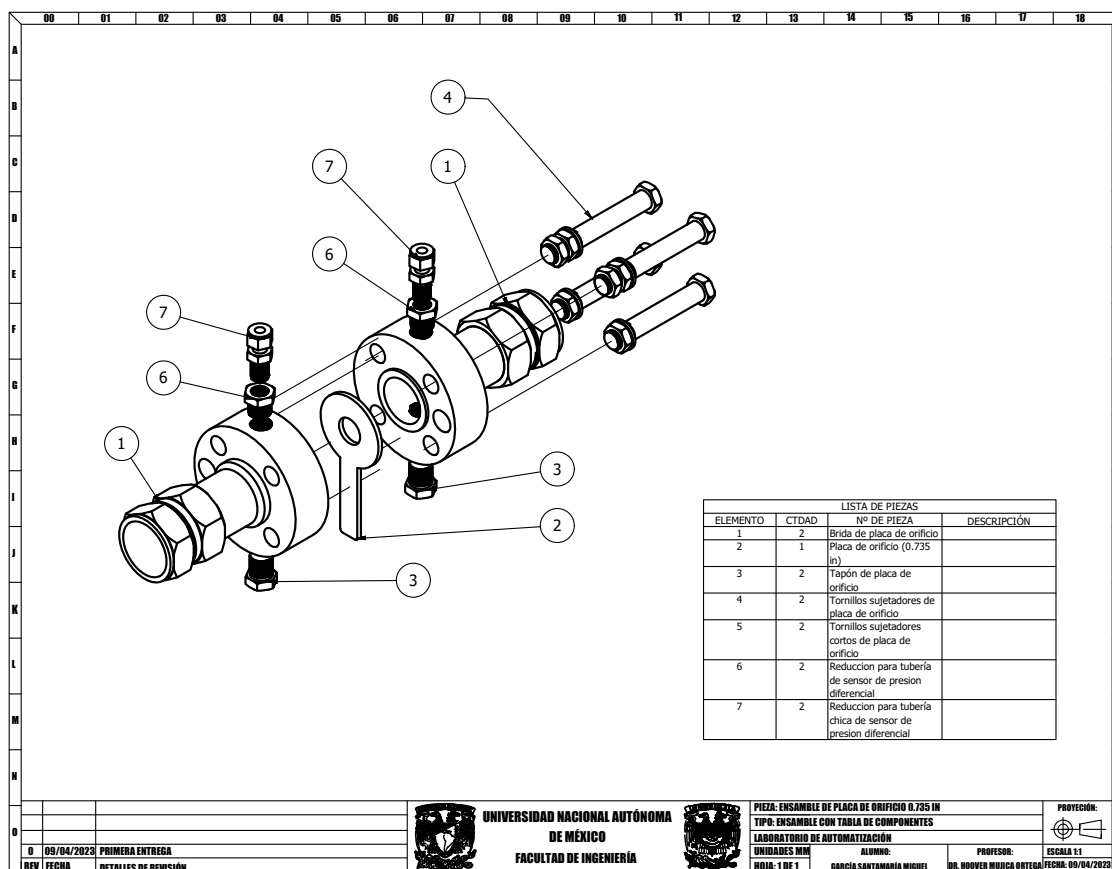


Figura A.5 Ensamble explosionado y tabla de componentes de placa de orificio

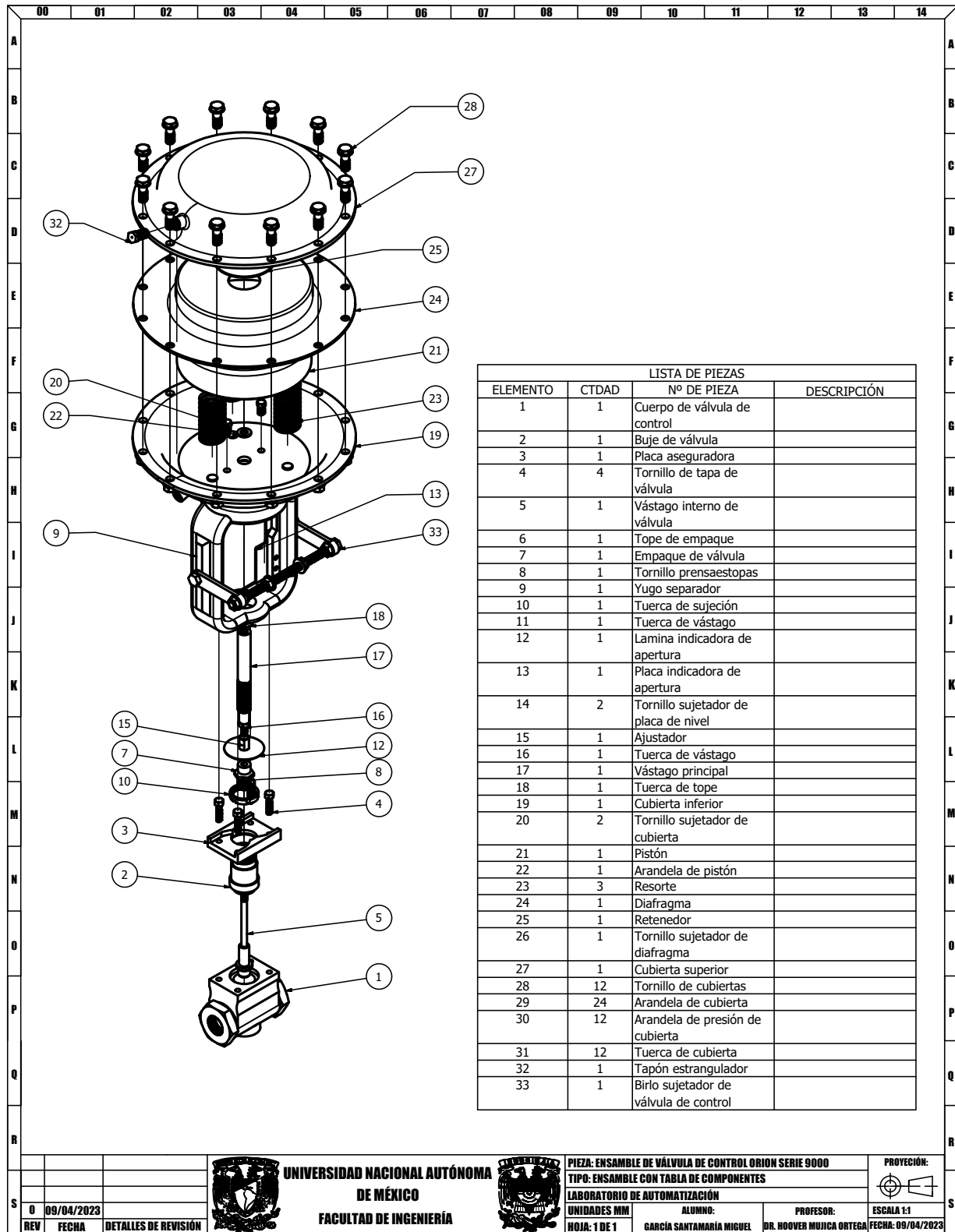


Figura A.6 Ensamble explosionado y tabla de componentes de válvula de control Orion serie 9000

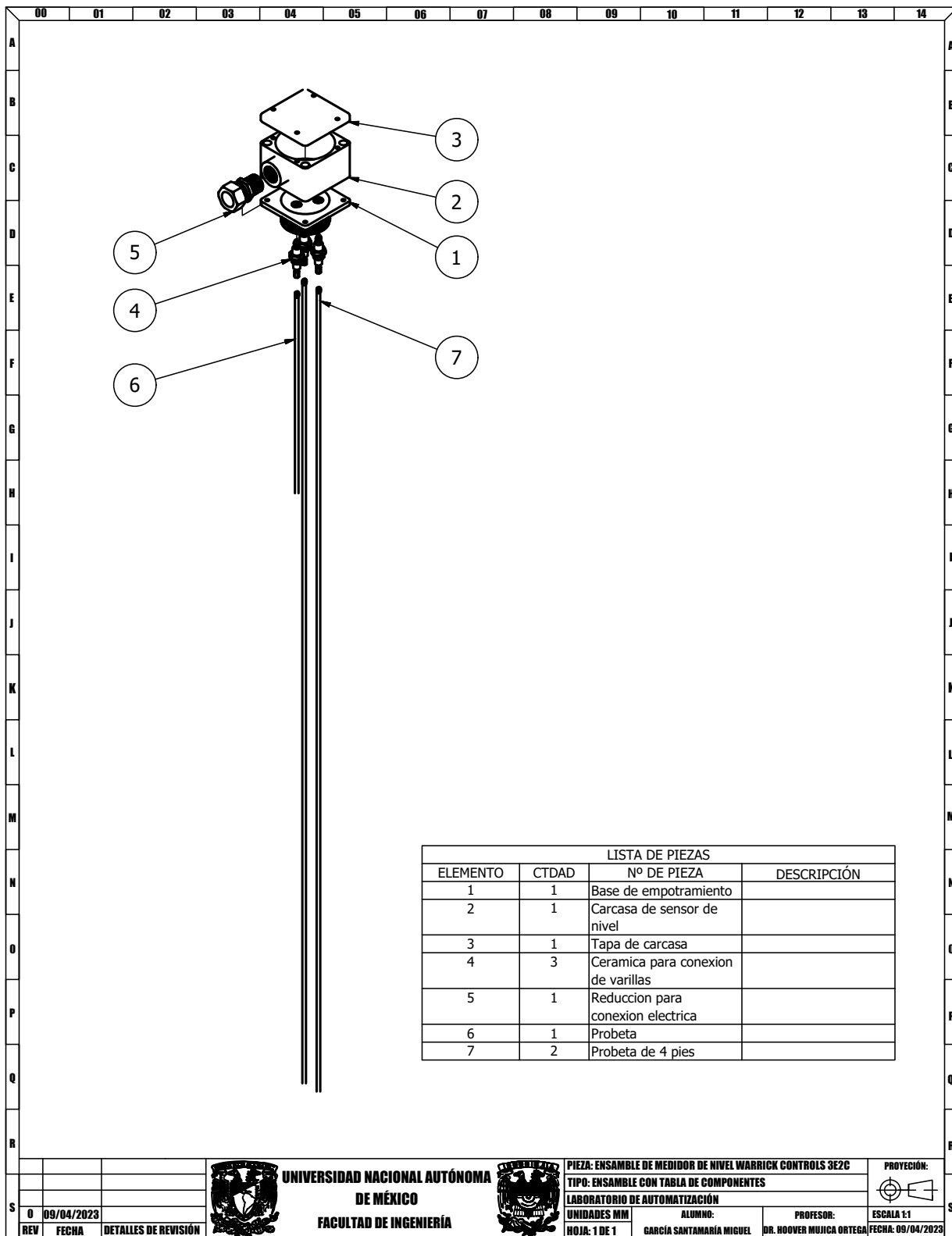


Figura A.7 Ensamble explosionado y tabla de componentes de sensor de nivel Warrick

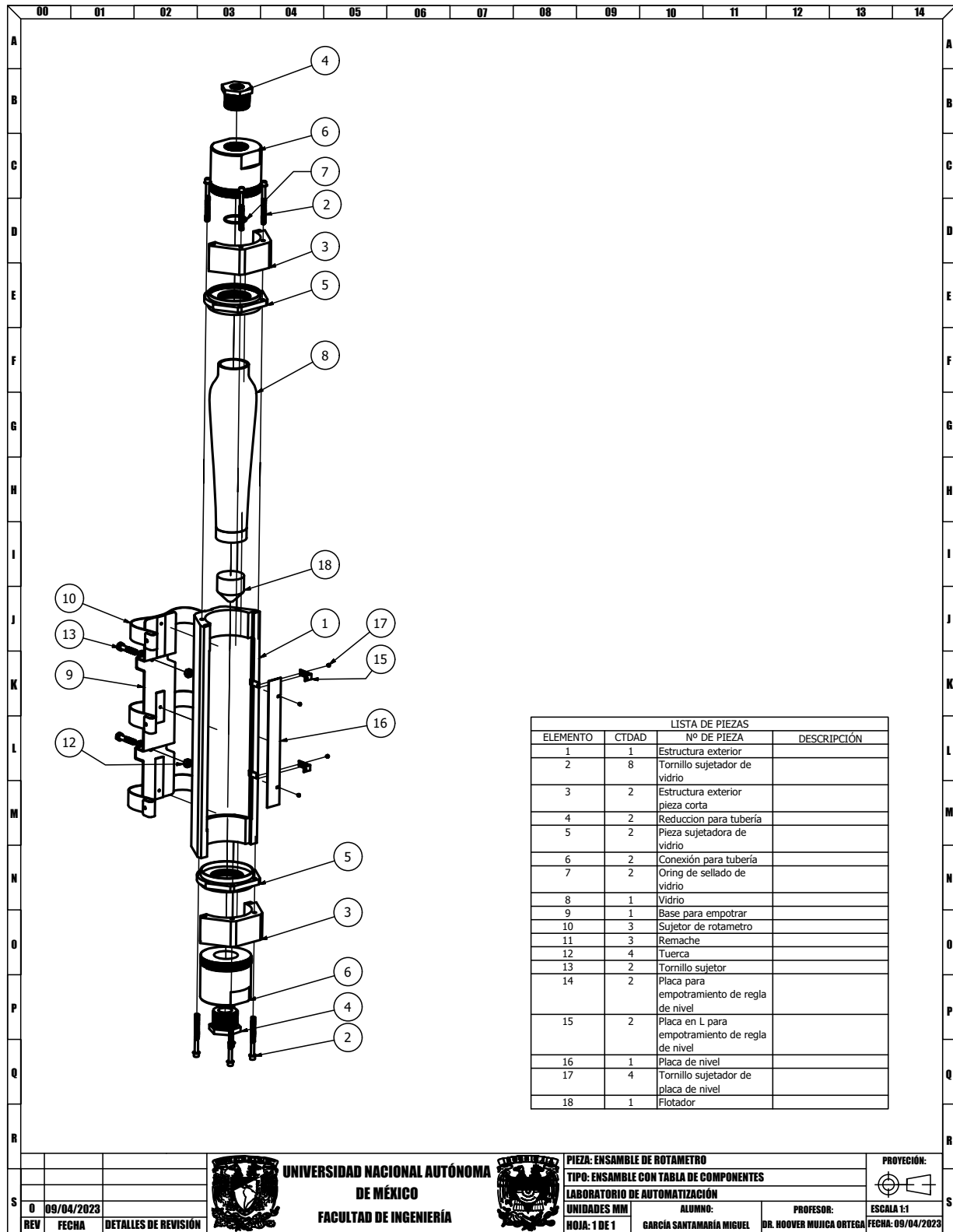


Figura A.8 Ensamble explosionado y tabla de componentes de rotámetro

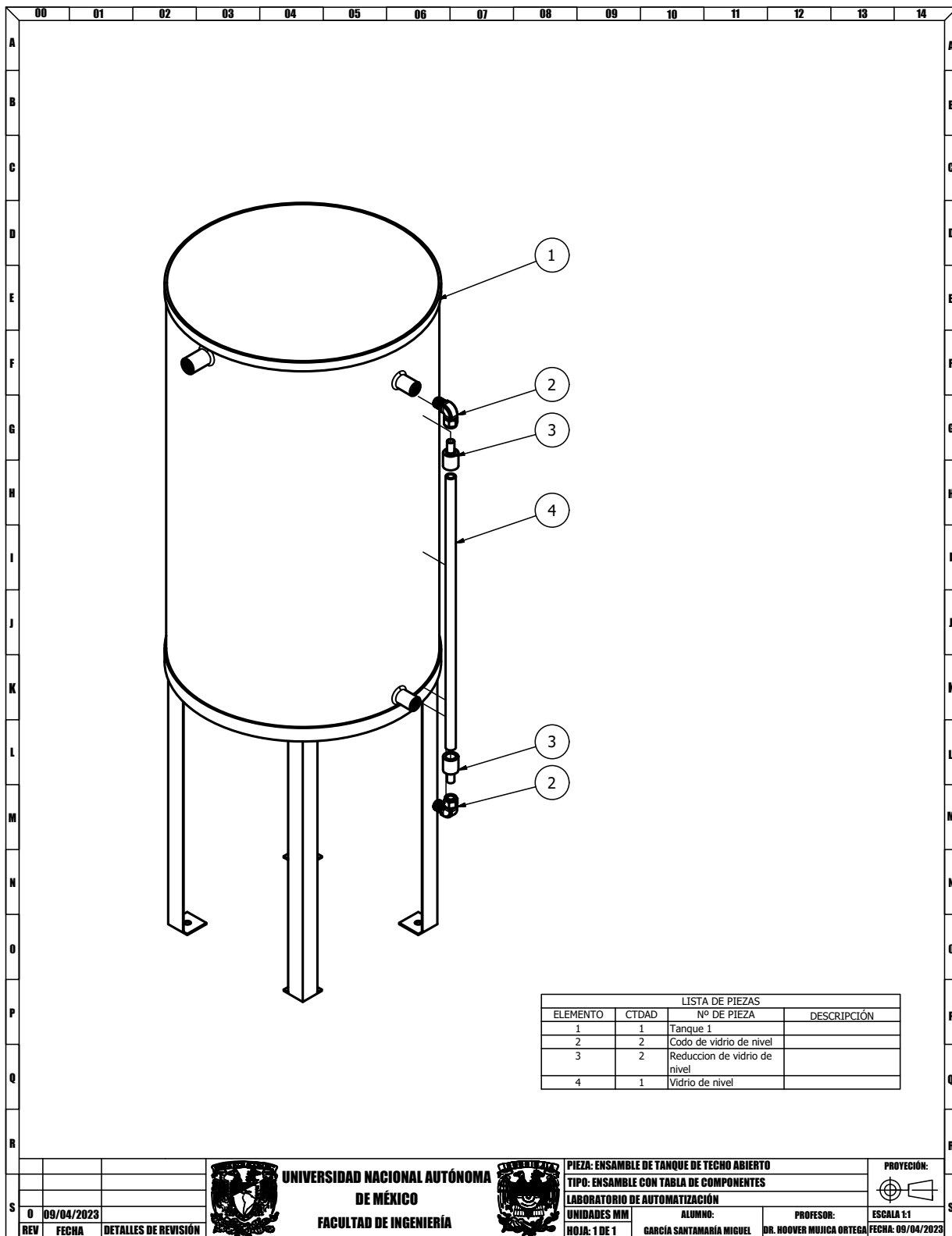


Figura A.9 Ensamble explosionado y tabla de componentes de tanque de techo abierto

Apéndice B

Diagramas de bloques en Matlab/Simulink

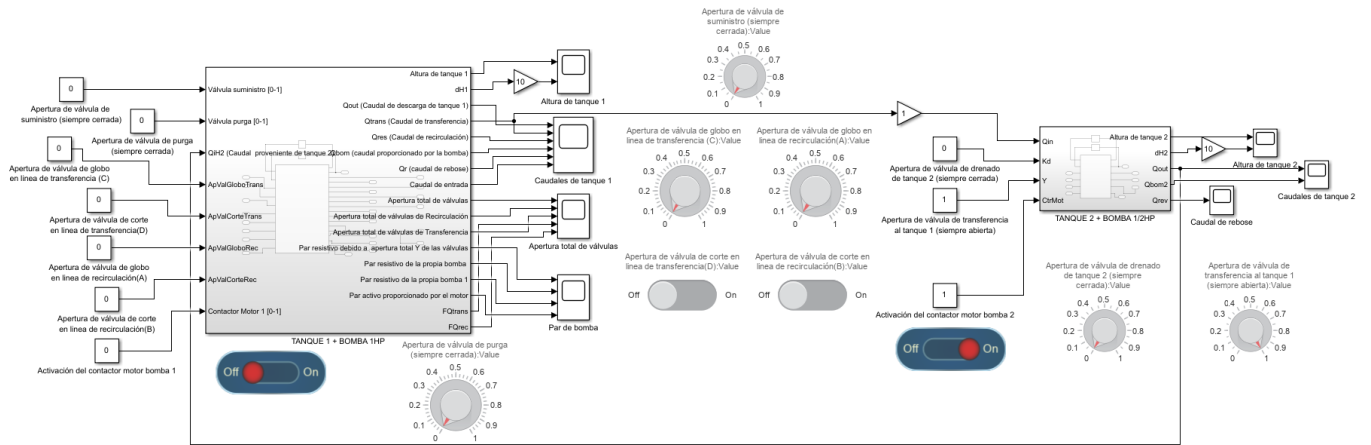


Figura B.1 Diagrama de bloques en Simulink - Planta Hidráulica completa

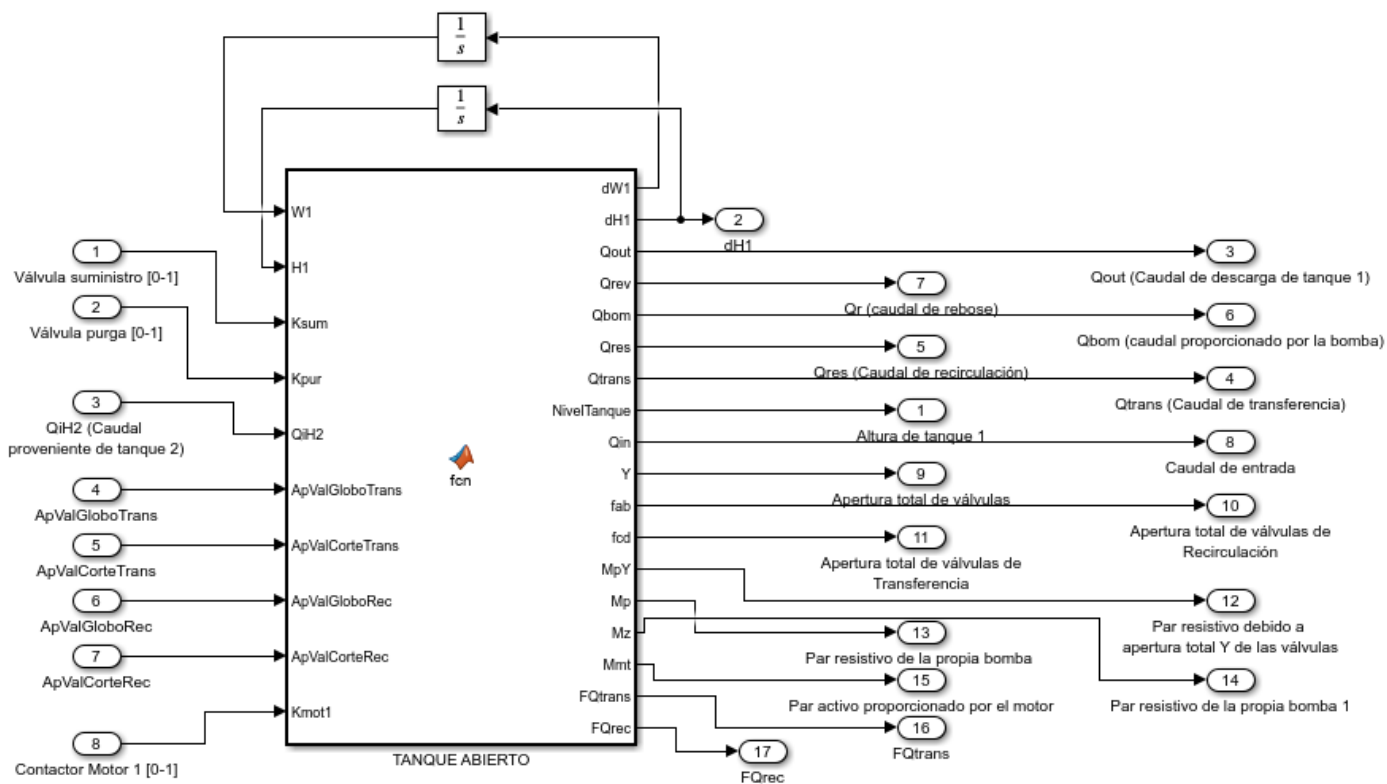


Figura B.2 Diagrama de bloques en Simulink - Subsistema de tanque de techo abierto

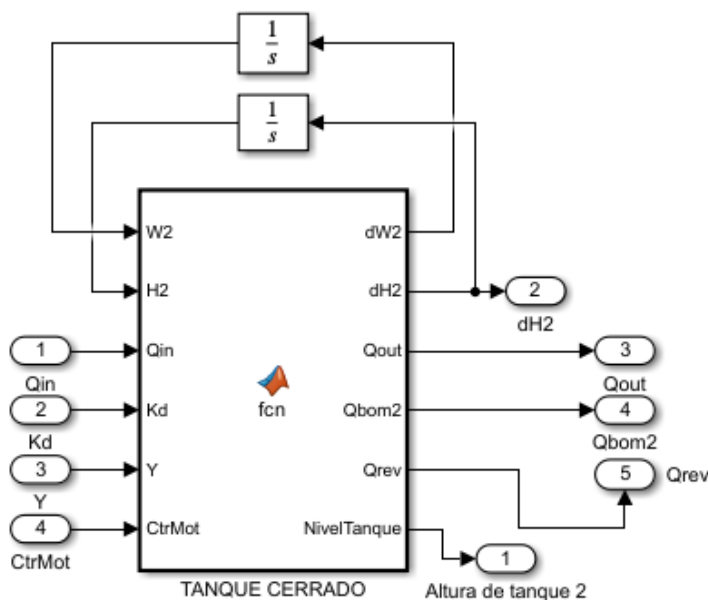


Figura B.3 Diagrama de bloques en Simulink - Subsistema de tanque de techo cerrado

Apéndice C

Código fuente en Matlab/Simulink

C.1. Código completo del modelado de tanque de techo abierto y bomba centrífuga

```
1 function [dWl, dH1, Qout, Qrev, Qbom, Qres, Qtrans, NivelTanque, Qin, Y, fab, fcd, MpY, Mp, Mz, Mmt
2 , FQtrans, FQrec] = fcn(Wl, H1, Ksum, Kpur, QiH2, ApValGloboTrans, ApValCorteTrans, ApValGloboRec,
3 ApValCorteRec, Kmot1)
4
5 % (Wl) = Velocidad angular del motor de la bomba (rad/s)
6 % (Qout) Caudal total de salida del tanque 1
7
8 % Bomba Centrífuga
9 Kz = 0.00023; % Constante de ponderacion de par viscoso (Nm s/rad)
10 kp = 3.2; % Constante de ponderacion de par resistivo
11 kv = 0.00001; % Constante de ponderacion de apertura de la valvula
12 kc = 190; % Constante del cambio de apertura en la valvula (m^6/s^2)
13 kw = 0.1856; % Constante de velocidad angular afecta directamente al flujo qv2(Qbomb)
14 rho = 997.1; % Densidad del liquido (Kg/m^3)
15 g = 9.8; % Aceleracion de la gravedad (m/s^2)
16 hgv = 0.10; % Altura de la salida de la bomba a la base del tanque (m), altura del tubo de salida
17 pb = 101325; % 101325 Pa – Presion atmosferica en pascales (Kg/m*s^2) = (N/m^2)
18 p2 = 108302; % Presion de columna de agua que ayuda a la bomba en pascales (Kg/m*s^2) = (N/m^2)
19
20 f = 60; % Frecuencia de suministro de energia al motor (Hz)
21 U = 110; % Voltaje de suministro al motor (V)
22 Kmt = 0.00000362; % Constante del torque activo que proporciona el motor
23 J = 0.03546; % Inercia del motor (Eje de motor, propela, liquido considerado como solido dentro de
24 la propela) (kg m^2)
25
26 a = ApValGloboRec; % de 0 a 1
27 b = ApValCorteRec; % 0 o 1
28
29 c = ApValGloboTrans; % de 0 a 1
30 d = ApValCorteTrans; % 0 o 1
31
32 fab = a + b - a*b; % a+b-a*b Apertura total del sistema de valvulas en paralelo de recirculacion
33 fcd = c + d - c*d; % c+d-c*d Apertura total del sistema de valvulas en paralelo de transferencia
34
35 %Apertura total del sistema de las 4 valvulas en paralelo:
```

```

33 Y = fix(fab + fcd) + ((fab + fcd) * sign(1 - fcd)) * (1 - fix(fab + fcd)) - fix(fab) * fix(fcd);
34
35 Kn = 40*Kz; % Constante de ponderacion de par viscoso debido a las valvulas
36
37 % Condicion que considera la presion de la columna de agua, la presion a la salida de la bomba y la
38 % velocidad de la bomba:
39 AA = (kw * Wl^2 + rho * g * hgv + pb - p2);
40 Qbom = ((kv * Y)/(sqrt(1 + kc * (kv^2) * Y^2))) * sqrt(sign(AA) * AA); % Caudal proporcionado por
41 % la bomba
42 MpY = ((2/(1 + Y)) - 1) * Kn * Wl; % Par resistivo de valvulas que depende de la apertura de
43 % las valvulas
44 Mp = kp * Qbom * Wl + MpY; % Par resistivo que depende de la velocidad y caudal de la
45 % bomba
46 Mz = Kz * Wl; % Par viscoso o par debido a la friccion
47 Mnt = Kmot1 * Kmt * U^2 * (2 * pi * f - Wl); % Par activo proporcionado por el motor (2.03 Nm^2
48 % para motor de 1 HP a 366.5 rad/s)
49
50 % Ecuacion de movimiento del conjunto motor-bomba debido a que la aceleracion angular es proporcional
51 % al par en el eje:
52 dWl = (1/J) * (Mnt - (Mp + Mz));
53
54 % (H) Altura del liquido dentro del tanque 1 (m)
55 % (Qsum) Caudal de manguera de suministro 0.000726 (m^3/s)
56 % (Kpur) Apertura de la valvula de purga (0-1)
57 % (Kdes) Apertura de la valvula de descarga (0-1)
58 % (Qb) Caudal de salida proporcionado por la bomba de 1 hp (m^3/s)
59 % (QiH2) Caudal de entrada procedente del tanque 2 (m^3/s)
60 % (Qres) Caudal de entrada procedente de la recirculacion del tanque 1 (m^3/s)
61
62 D1 = 0.50512; % Diametro del tanque 1 (m)
63 AT1 = pi * (D1^2)/4; % Area del tanque 1 (m^2)
64 g = 9.81; % Aceleracion de la gravedad (m/s^2)
65 Dpur = 0.01905; % Diametro del ducto de purga 3/4 pulg = 19.05 mm = 0.01905 (m)
66 Ddes = 0.03175; % Diametro del ducto de transferencia 1 1/4 pulg = 31.75 mm = 0.03175 (m)
67 Hlmax = 0.686; % Altura maxima del tanque
68 Hlmin = 0.01; % Altura minima del tanque
69 Apur = pi * (Dpur^2)/4; % Area de la seccion transversal del ducto de purga (m^2)
70
71 %Factor(0,1,1/2) que determina el caudal al inicio del sistema de recirculacion por continuidad de
72 % flujo:
73 FQrec = sign(fcd)*(fab*(1-fcd/2))+sign(fab)-sign(fab*fcd)*(sign(fcd)*(fab*(1-fcd/2))+1/2);
74
75 %Factor(0,1,1/2) que determina el caudal al inicio del sistema de transferencia por continuidad de
76 % flujo:
77 FQtrans = sign(fab)*(fcd*(1-fab/2))+sign(fcd)-sign(fcd*fab)*(sign(fab)*(fcd*(1-fab/2))+1/2);
78
79 % Condicion de vaciado de tanque, verifica: if H>Hmin then Qout=... else Qout=0:
80 CondicionA = (sign(H1 - Hlmin) + abs(sign(H1 - Hlmin)))/2;
81
82 %Caudales despues de las valvulas de control y corte
83 % Caudal total de la bomba - caudal de transferencia al tanque 2 debido a continuidad de flujo:
84 Qres = FQrec * Qbom * fab * CondicionA;
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99

```

```

80 % Caudal total de la bomba – caudal de recirculación al tanque 1 debido a continuidad de flujo:
81 Qtrans = FQtrans * Qbon * fcd * CondicionA;
82
83 % Caudal procedente de la apertura de la valvula de suministro (m3/s) 0.000726 = Caudal proporcionado
      por la manguera *Ksum = Apertura de la valvula de suministro:
84 Qsum = Ksum * 0.000726;
85 Qin = Qsum + QiH2 + Qres; % Caudal total de entrada al tanque abierto (m3/s)
86 Qpur = Kpur * Apur * sqrt(2 * g * H1); % Caudal de purga de tanque 1
87
88 % Condicion de llenado de tanque, verifica: if H>Hmax && Qin>0 Qrev=... else Qrev=0
89 CondicionB = (sign(H1 - Hlmax) + abs(sign(H1 - Hlmax)))/2*((sign(Qin) + abs(sign(Qin)))/2);
90
91 % Efecto de movimiento superficial del agua y se acentua con la caída de agua por Qin
92 Medicion = abs((0.0015*sin(8*Ddes)+0.002*sin(3*Ddes)+0.002*sin(1*Ddes)) * (1/(H1+0.25))*(100*Qin/(Qin
      +1)));
93
94 TurbuRebose = Medicion * 0.025; % Incluye efectos del movimiento superficial del agua
95 NivelTanque = H1 + Medicion; % Incluye efectos del movimiento superficial del agua + ruido de
      medicion
96
97 Qout = Qpur + Qtrans + Qres; %Caudal total de salida del tanque abierto (m3/s)
98 Qrev = abs(Qin - Qout + TurbuRebose) * CondicionB; % Caudal de rebose
99
100 dHI = (1/AT1) * (Qin - Qout - Qrev);

```

C.2. Código completo del modelado de tanque de techo cerrado y bomba centrífuga

```

1 function [dW2, dH2, Qout, Qbom2, Qrev, NivelTanque] = fcn(W2, H2, Qin, Kd, Y, CtrMot)
2
3 % (W2) Velocidad angular del motor de la bomba (rad/s)
4 % (Y) Apertura de valvula de transferencia (0-1)
5
6 % Modelo Bomba Centrifuga
7 Kz = 0.00021; % Constante de ponderacion de par viscoso (Nm s/rad), afecta al par resistivo al
   cerrar las valvulas por completo ya que el flujo se hace cero
8 kp = 0.3; % Constante de ponderacion de par resistivo
9 kv = 0.00001; % Constante de ponderacion de apertura de la valvula
10 kc = 190; % Constante del cambio de apertura en la valvula (m^6/s^2)
11 kw = 0.165; % Constante de velocidad angular afecta directamente al flujo qv2
12 rho = 997.1; % Densidad del liquido (Kg/m^3)
13 g = 9.8; % Aceleracion de la gravedad (m/s^2)
14 hgv = 0.10; % Altura de la salida de la bomba a la base del tanque (m), altura del tubo de salida
15 pb = 101325; % Presion de columna de agua que ayuda a la bomba en pascales (Kg/m*s^2) = (N/m^2)
16 p2 = 102302; % Presion atmosferica en pascales (Kg/m*s^2) = (N/m^2)
17
18 f = 60; % Frecuencia de suministro de energia al motor (Hz)
19 U = 110; % Voltaje de suministro al motor (V)
20 Kmt = 0.0000004; % Constante del torque activo que proporciona el motor
21 J = 0.00304675; % Inercia del motor (Eje de motor, propela, liquido considerado como solido dentro de
   la propela) (kg m^2)
22
23 % Condicion que considera la presion de la columna de agua, la presion a la salida de la bomba y la
   velocidad de la bomba:
24 AA = (kw * W2^2 + rho * g * hgv + pb - p2);
25
26 Qbom2 = ((kv * Y)/(sqrt(1 + kc * (kv^2) * Y^2))) * sqrt(abs(AA)); % Caudal proporcionado por la bomba
27
28 MpY = (1/(0.1 + Y)) * Kz * W2; % Par resistivo de valvulas que depende de la apertura
   de las valvulas
29 Mp = kp * Qbom2 * W2 + MpY; % Par resistivo que depende de la velocidad y caudal de la
   bomba
30 Mz = Kz * W2; % Par viscoso o par debido a la friccion
31 Mmt = CtrMot * Kmt * U^2 * (2 * pi * f - W2); % Par activo proporcionado por el motor (1.03 Nm^2
   para motor de 1/2 HP a 363 rad/s)
32
33 dW2 = (1/J) * (Mmt - (Mp + Mz));
34
35 % (H) Altura del liquido dentro del tanque 2 (m)
36 % (Qin) Caudal de entrada procedente del tanque 2 (m^3/s)
37 % (Kd) Apertura de la valvula de drenado (0-1)
38 % (Kt) Apertura de la valvula de transferencia (0-1)
39 % (Qbom2) Caudal de salida proporcionado por la bomba de 1/2 hp (m^3/s)
40
41 D2 = 0.50512; % Diametro del tanque 2 (m)
42 AT2 = pi * (D2^2)/4; % Area del tanque 2 (m^2)
43 g = 9.81; % Aceleracion de la gravedad (m/s^2)
44 Dpur = 0.01905; % Diametro del ducto de drenado 3/4 pulgada = 19.05 mm = 0.01905 (m)
45 Ddes = 0.03175; % Diametro del ducto de transferencia 1 1/4 pulg = 31.75 mm = 0.03175 (m)

```

```

46 Hmax = 0.686;           % Altura maxima del tanque 2
47 Hmin = 0.01;          % Altura minima del tanque 2
48
49 Apur = pi * (Dpur^2)/4; % Area de la seccion transversal del ducto de drenado (m^2)
50
51 % Condicion de vaciado de tanque, verifica: if h>0.01 then q0=... else q0=0
52 CondicionA = (sign(H2 - Hmin)+abs(sign(H2 - Hmin)))/2;
53
54 % Condicion de llenado de tanque, verifica: if h>hmax && qi>0 qr=... else qr=0
55 CondicionB = (sign(H2 - Hmax) + abs(sign(H2 - Hmax)))/2*((sign(Qin) + abs(sign(Qin)))/2);
56
57 % Efecto de movimiento superficial del agua y se acentua con la caida de agua por qi
58 Medicion = abs((0.0015*sin(8*Ddes) + 0.002*sin(3*Ddes) + 0.002*sin(1*Ddes))*(1/(H2 + 0.25))*(100*Qin/(
    Qin + 1)));
59
60 TurbuRebose = Medicion * 0.025; % Incluye efectos del movimiento superficial del agua
61 NivelTanque = H2 + Medicion; % Incluye efectos del movimiento superficial del agua + ruido de
    medicion
62 Qpur = Kd * Apur * sqrt(2 * g * H2); % Caudal de purga de tanque 2
63
64 Qdren = (Qpur + Qbom2) * CondicionA; % Caudal de salida total del tanque en (m^3/s)
65 Qrev = abs(Qin - Qdren + TurbuRebose) * CondicionB; % Caudal de rebose
66 Qout = (Qbom2) * CondicionA; % Caudal de descarga al tanque 1
67
68 dH2 = (1/AT2) * (Qin - Qdren - Qrev);

```


Referencias

- [Alexandrov, *et al.*, 2021] Alexandrov, I. A., Muranov, A. N., & Mikhailov, M. S. (2021). Development of an algorithm for automated evaluation of the operability of structural elements of shut-off valves. In *2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT QM IS)* (pp. 257–261). (Citado en página 13.)
- [Badger Meter, 2022] Badger Meter, I. (2022). Model 9000 globe style control valve <https://www.badgermeter.com/products/valves/model-9000-globe-style-control-valve/>. (Citado en páginas 31 y 32.)
- [Claudio, 1982] Claudio, M. (1982). Mecanica de fluidos y maquinas hidráulicas. In *1982 Mecanica de fluidos y maquinas hidráulicas. Segunda edicion* (pp. 203–223). (Citado en página 52.)
- [Emerson Electric, 2020] Emerson Electric, C. (2020). Data sheets: 67c series instrument supply regulators bulletin, fisher-en <https://www.emerson.com/en-us/catalog/fisher-67c>. (Citado en página 42.)
- [Emerson Electric, 2022] Emerson Electric, C. (2022). Rosemount 1495 placa de orificio <https://www.emerson.com/documents/automation/hoja-de-datos-del-producto-rosemount-1495-placa-de-orificio-rosemount-1496-brid-as-de-caudal-es-es-88954.pdf>. (Citado en página 36.)
- [Gems, 2015] Gems, S. (2015). Warrick® conductivity-based liquid level control <https://distribuidoradict.com/wp-content/uploads/2015/02/sensores-de-conductividad.pdf>. (Citado en página 22.)
- [Grieves M, 2017] Grieves M, V. J. (2017). Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems, kahlen fj, flumerfelt s, alves a. transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches. In *2017 Springer International Publishing* (pp. 85–113). (Citado en página 8.)
- [Janevska, 2013] Janevska, G. (2013). Mathematical modeling of pump system. (Citado en páginas 53 y 54.)
- [Lee y Park, 2014] Lee, C. & Park, S. (2014). Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. In *Journal of Computational Design and Engineering* (pp. 213–222). (Citado en página 10.)
- [Li, *et al.*, 2010] Li, W., Wang, W., Wu, Y., & Lu, J. (2010). Experiments and simulation of mass flux measurement of supercritical water by orifice plate. In *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (pp. 1–4). (Citado en página 16.)
- [Moore, 1998] Moore, P. a. s. (1998). User´s manual, xtc transmitters series 340 pressure transmitter-controllers <https://s1.dtsheet.com/store/data/001827405.pdf?key=6944c189578ff909b3232d09310b931b&r=1>. (Citado en página 46.)
- [Protic, *et al.*, 2020] Protic, A., Jin, Z., Marian, R., Abd, K., Campbell, D., & Chahl, J. (2020). Implementation of a bi-directional digital twin for industry 4 labs in academia: A solution based on opc ua. In *2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IIEEM)* (pp. 979–983). (Citado en página 3.)

- [RUIZ, 2016] RUIZ, L. M. V. (2016). Tanques atmosféricos, a presión y criterios de diseño de tanques atmosféricos según api-650 <http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/9628/Informe1.pdf?sequence=5&isAllowed=y>. (Citado en página 19.)
- [Siemens, 2022] Siemens (2022). Diseño asistido por ordenador(cad) <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>. (Citado en página 25.)
- [Smar Technology, 2010] Smar Technology, C. (2010). Transmisor inteligente de presión con control pid incorporado <https://www.smar.com/pdfs/manuals/ld301ms.pdf>. (Citado en página 43.)
- [WIKA, 2019] WIKA (2019). Placa de orificio, modelo flc-op https://www.wika.com.mx/upload/DS_FL1001_es_es_89341.pdf. (Citado en página 16.)
- [Yunus A. Cengel, 2014] Yunus A. Cengel, J. M. C. (2014). Fluid mechanics. fundamentals and applications. In *2014 Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications. Third edition* (pp. 347–436). (Citado en páginas 48, 49, 51 y 55.)
- [Zhong, 2010] Zhong, C. K. (2010). The optimal choice of computer-aided design software in modern industrial design. In *2010 IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design Conceptual Design 1*, volume 1 (pp. 153–155). (Citado en página 25.)
- [Zhuang Cunbo, 2017] Zhuang Cunbo, Liu Jianhua, X. H. D. X. L. S. W. G. (2017). The connotation, architecture and development trend of product digital twins. In *2017 Computer Integrated Manufacturing System* (pp. 753–768). (Citado en página 8.)