

**ENTORNO HARDWARE IN THE LOOP SIMULATION PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE
PROCESOS INDUSTRIALES EN EL PIAI**



**Cristian Camilo Gómez Medina
Andrés Felipe González Ordoñez**

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
INGENIERÍA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL
POPAYÁN
2017

**ENTORNO HARDWARE IN THE LOOP SIMULATION PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE
PROCESOS INDUSTRIALES EN EL PIAI**



Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en Automática Industrial

**Cristian Camilo Gómez Medina
Andrés Felipe González Ordoñez**

Director: Mg. Juan Fernando Flórez Marulanda

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
INGENIERÍA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL
POPAYÁN
2017

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS.....	12
CAPÍTULO 1: CONTEXTUALIZACIÓN	14
1.1. Hardware in the Loop Simulation.....	14
1.2. Estado del arte.....	15
1.3. Diagnóstico asociado a las plantas del laboratorio de control de procesos industriales del PIAI.....	20
1.3.1. Estado de las plantas	21
1.3.2. Condiciones de las guías de prácticas	29
1.3.3. Contexto estudiantil	32
1.3.4. Métodos de enseñanza utilizados	33
CAPÍTULO 2: DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONALIDADES DEL ENTORNO HILS	36
2.1. Definición de las funcionalidades del entorno HILS.....	36
2.2. Procedimiento para seleccionar el entorno HILS a implementar	37
2.2.1. Elección del tipo de proceso y planta de laboratorio utilizado como caso de estudio	37
2.2.2. Descripción de la planta de laboratorio Amatrol T5552.....	42
2.2.3. Elección del método de aprendizaje a utilizar.....	42
2.2.4. Descripción del método de aprendizaje	44
2.2.5. Elección del entorno HILS.....	45
CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACION DEL LABORATORIO VIRTUAL SOPORTADO EN EL ENTORNO HILS.....	49
3.1. Arquitectura del entorno HILS propuesto	49
3.1.1. Elementos de la arquitectura	49
3.1.2. Interconexión de elementos de la arquitectura.....	50
3.1.3. Flujo de dato de la arquitectura.....	51
3.2. Diseño de circuitos de planta y HMI del laboratorio virtual	52
3.2.1. Circuitos de recorrido.....	52
3.2.2. HMI del Supervisorio.....	56
3.3. Procedimiento para la implementación del entorno HILS.....	57

3.3.1.	Planta virtual	57
3.3.2.	Comunicación Ethernet.....	61
3.3.3.	Edición de lógica de control.....	61
3.3.4.	Servidor OPC	63
3.3.5.	Conexión entre el Servidor OPC y el modelo de la planta virtual	64
3.3.6.	Supervisorio	65
3.4.	Pruebas de funcionamiento del Entorno	68
3.4.1.	Toma de tiempos	68
3.4.2.	Prueba de tiempos de muestreo y análisis de respuesta temporal	69
3.4.3.	Prueba de control.....	78
3.5.	Refinamiento del laboratorio virtual en el entorno HILS	83
3.5.1.	Ajustes al método de aprendizaje.....	84
3.5.2.	Ajustes a la guía	85
3.5.3.	Ajustes al supervisorio	85
CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL SOPORTADO EN EL ENTORNO HILS.....		88
4.1.	Cálculo de la muestra de estudiantes para la evaluación	88
4.1.1.	Marco teórico sobre selección de una muestra.	88
4.1.2.	Procedimiento para la selección de la muestra	89
4.2.	Diseño experimental.....	90
4.3.	Evaluación del laboratorio virtual.....	92
4.4.	Resultados de la evaluación del examen de conocimientos	93
4.4.1.	Resultados a nivel individual y general	93
4.4.2.	Resultados por cada sección.....	94
4.5.	Análisis de los resultados de la evaluación.....	96
4.5.1.	Análisis resultados individuales	96
4.5.2.	Análisis resultados generales	98
4.5.3.	Análisis resultados por cada sección del examen	99
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		105
5.1.	Conclusiones.....	105
5.2.	Recomendaciones.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Plantas normalmente utilizadas para HILS en procesos industriales.....	17
Tabla 2. Herramientas software usadas para implementar entornos HILS en procesos industriales.	18
Tabla 3. Métodos de aprendizaje utilizados en laboratorios de control de procesos industriales.	20
Tabla 4. Elementos hardware no vinculados directamente a las plantas del LCP.	23
Tabla 5. Número y valor de cada opción de calificación.	24
Tabla 6. Resultados y puestos obtenidos por las plantas respecto al estado hardware.	25
Tabla 7. Resultados y puestos obtenidos por las plantas respecto al estado software.	27
Tabla 8. Calificaciones y puestos obtenidos por las plantas respecto al tipo de problemas.	28
Tabla 9. Resultados y puestos obtenidos por las plantas respecto a las problemáticas.....	28
Tabla 10. Resultados del diagnóstico para seleccionar la mejor planta.	29
Tabla 11. Respuestas a: ¿Qué tipo de métodos de aprendizaje usted aplica en el laboratorio?	34
Tabla 12. Criterios de evaluación de la planta tipo.	38
Tabla 13. Asignación y cálculo de porcentajes a los criterios de evaluación de la planta tipo.	39
Tabla 14. Evaluación de las plantas tipo acorde a los criterios.....	39
Tabla 15. Criterios de comparación para las plantas del LCP.	40
Tabla 16. Asignación y cálculo de porcentajes para los criterios de comparación de las plantas del LCP.	41
Tabla 17. Comparación de las plantas del LCP y la planta tipo de acuerdo a los cinco criterios.....	41
Tabla 18. Criterios de evaluación para el método a utilizar.....	43
Tabla 19. Asignación y cálculo de porcentajes para los criterios de evaluación de los métodos de aprendizaje.....	43
Tabla 20. Evaluación de los métodos.....	44
Tabla 21. Criterios de evaluación del entorno HILS.....	45
Tabla 22. Niveles de prioridad de los criterios de evaluación del entorno HILS.	46
Tabla 23. Evaluación de los entornos HILS.....	46
Tabla 24. Tags para la apertura de los circuitos de la planta virtual.	55
Tabla 25. Tags a crear para el desplazamiento entre pantallas.	57
Tabla 26. Comparación de resultados prueba de tiempo planta virtual vs Amatrol.	68
Tabla 27. Síntesis de las pruebas realizadas para el refinamiento del laboratorio virtual...	83
Tabla 28. Ficha técnica de la evaluación del laboratorio virtual.....	91
Tabla 29. Ficha técnica de las pruebas de laboratorio virtual, Amatrol y virtual-Amatrol.	92
Tabla 30. Resultados generales de las pruebas de evaluación del laboratorio virtual.	93
Tabla 31. Obtención de porcentaje por pregunta.	94
Tabla 32. Resultados por secciones de las tres pruebas de evaluación del laboratorio virtual.	95

Tabla 33. Resultado global de la evaluación de las tres pruebas experimentales. 103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Entorno HILS	14
Figura 2. Respuestas a: ¿En qué estado funcional se encuentra el hardware de las siguientes plantas?.....	25
Figura 3. Respuestas a: ¿En qué estado funcional se encontraba el software de las siguientes plantas en su experiencia como estudiante?.....	27
Figura 4. Respuestas a: ¿Qué tipo de problemas presentan las siguientes plantas?.....	28
Figura 5. Respuestas a: ¿Están actualizadas las guías de laboratorio de las plantas?.....	30
Figura 6. Respuestas a: ¿Las prácticas presentes en las guías están orientadas de acuerdo a las funcionalidades que presentan las plantas?	30
Figura 7. Respuestas a: ¿Quién/quienes realizan la actualización de las guías?.....	31
Figura 8. Respuestas a: ¿Qué sección de las guías era la que mayor esfuerzo académico le exigía?	31
Figura 9. Respuestas a: ¿Con la información de las guías de laboratorio le era posible realizar satisfactoriamente las prácticas?	32
Figura 10. Planta Amatrol T5552.	42
Figura 11. Estructura y herramientas software del Entorno HILS a implementar.....	47
Figura 12. Procedimiento de interconexión de elementos en la arquitectura del entorno HILS.	51
Figura 13. Flujo de datos en la arquitectura del Entorno HILS.	52
Figura 14. Flujo en el circuito principal de la planta Amatrol.....	53
Figura 15. Flujo en el circuito secundario de la planta Amatrol.....	54
Figura 16. Flujo en el circuito total de la planta Amatrol.	55
Figura 17. Diseño de la pantalla principal de la supervisión de la planta virtual.	56
Figura 18. Diseño de la pantalla de gráficos de la supervisión de la planta virtual.....	57
Figura 19. Ingreso de módulos de equipo y de control al modelo de la planta.....	58
Figura 20. Definición de las variables del proceso.	58
Figura 21. Ingreso de parámetros para los equipos e instrumentos del modelo.	59
Figura 22. Ingreso de variables en el recorrido del modelo.....	59
Figura 23. a) P&ID Planta Amatrol b) Modelo CADSIM Plus planta Amatrol.	60
Figura 24. Driver para la comunicación Ethernet entre los componentes PC y PLC, a través del módulo 1756-ENBT.....	61
Figura 25. Tags usadas en el código de control del laboratorio virtual.	62
Figura 26. Sección del ladder encargada de la configuración del recorrido del líquido por cada circuito.	62
Figura 27. Sección del ladder encargada de la configuración del controlador PID.....	63
Figura 28. Servidor OPC creado para permitir el flujo de datos entre el componente PLC y las herramientas software.....	64
Figura 29. Vinculación de las tags entre KEPServerEX y CADSIM Plus.	65

Figura 30. Vinculación gráfica de las variables del modelo de la planta virtual con el acceso a Datos OPC.	65
Figura 31. Pantalla principal del supervisorio del laboratorio virtual creada en FactoryTalk View.	66
Figura 32. Pantalla de gráficas del supervisorio creada en FactoryTalk View.	67
Figura 33. Pantalla P&ID del supervisorio creada en FactoryTalk View.	68
Figura 34. Respuesta temporal planta real. a) Nivel b) Esfuerzo de control c) Flujo.	71
Figura 35. Respuesta temporal del sistema en el computador 1 con tiempo de muestreo de 180ms.	72
Figura 36. Respuesta temporal del sistema en el computador 1 con tiempo de muestreo de 60ms.	73
Figura 37. Respuesta temporal del sistema en el computador 1 con tiempo de muestreo de 1.8s.	73
Figura 38. Respuesta temporal del sistema en el computador 1 con tiempo de muestreo. a) 3s, b) 6s.	74
Figura 39. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo de 180ms.	75
Figura 40. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo de 60ms.	75
Figura 41. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo a) 1.8s b) 3s.	76
Figura 42. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo de 6s.	77
Figura 43. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo de 9s.	77
Figura 44. Cambio de referencia de 0 - 4in planta real.	79
Figura 45. Cambio de referencia de 0 – 10cm planta simulada.	79
Figura 46. Cambio de referencia de 4 – 6in planta real.	80
Figura 47. Cambio de referencia de 10 – 15cm planta simulada.	81
Figura 48. Cambio de referencia de 6 – 5.5cm y activación de disturbio planta real.	82
Figura 49. Cambio de referencia de 6 – 5.5cm y activación de disturbio planta real.	82
Figura 50. Mejoras a la pantalla principal. a) Antes. b) Después.	86
Figura 51. Porcentaje de respuestas correctas por estudiante para el Lab. Virtual.	96
Figura 52. Porcentaje de respuestas correctas por estudiante para el lab. Amatrol.	97
Figura 53. Porcentaje de respuestas correctas por estudiante para los Lab. Virtual-Amatrol.	97
Figura 54. Porcentaje de respuestas correctas en general por laboratorio.	98
Figura 55. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección diagramas de planta.	99
Figura 56. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección instrumentación.	100
Figura 57. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección lógica de control.	101

Figura 58. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección válvula de control. 102

Figura 59. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección comunicaciones. 102

INTRODUCCIÓN

En diferentes sectores industriales y de tecnología, las restricciones económicas y del tiempo de las empresas, promueven la generación de soluciones accesibles para la verificación y la evaluación de diferentes procesos de producción y estrategias de control. Una de estas soluciones es la implementación de simulaciones computacionales de procedimientos realizados en las plantas de producción [1], las cuales tienen en cuenta la mayor cantidad de características y limitaciones físicas del proceso real, con el fin de poner a prueba o depurar algoritmos de control en un PLC [2]. Estas mismas restricciones se experimentan en el laboratorio de control de procesos (LCP) del programa de Ingeniería en Automática Industrial (PIAI) de la Universidad del Cauca. Además, el incremento en el número de estudiantes, ocasiona que la demanda de espacios de calidad para la realización de prácticas y talleres vaya en aumento. Al no contar el PIAI con los recursos necesarios para la adecuación de estos espacios, muchos alumnos no tienen la posibilidad de poner en práctica sus conocimientos.

En el Laboratorio de Control de Procesos del PIAI, existen diferentes plantas industriales de control (temperatura, presión, nivel, movimiento y multivariable). Aunque son funcionales, estas presentan limitaciones para implementar estrategias de control complejas, bien sea continuas o discretas. Además de una baja complejidad de los procesos, hay un número limitado de instrumentos de medición instalados en las plantas, tanto continuos como discretos; causando que los algoritmos de control desarrollados por los estudiantes para los PLC's, sean básicos y así mismo, sea su experiencia de aprendizaje.

En la actualidad, no es posible disponer de un alto presupuesto de inversión para mejorar los laboratorios del PIAI por parte del Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control (DEIC). Además, las plantas de procesos industriales comercialmente disponibles, evidencian las mismas limitaciones, anteriormente expuestas. Así mismo, los costos de estas plantas son elevados para la adquisición por parte de instituciones públicas.

Teniendo en cuenta los argumentos presentados, se plantea el presente proyecto de investigación. En él se propone el desarrollo de un entorno *Hardware in the Loop Simulation* (HILS), que permita realizar la simulación de un proceso industrial a partir de diferentes componentes hardware y herramientas software que brinden otra alternativa para la realización de prácticas de control de procesos con PLC en los laboratorios del PIAI.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Desarrollar un entorno *Hardware-in-the-loop-simulation* (HILS) que permita la realización de prácticas de control de procesos industriales con PLC, en un laboratorio virtual implementado en el PIAI de acuerdo a los recursos que este posee.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Definir las funcionalidades de un entorno diseñado a partir del enfoque de HILS para un laboratorio virtual en control de procesos industriales, acorde a los recursos disponibles en los laboratorios del PIAI.
- Implementar las funcionalidades de cada uno de los bloques constitutivos de un laboratorio virtual en control de procesos industriales que se soporten en HILS.
- Evaluar el entorno del laboratorio virtual en control de procesos industriales soportado en HILS, mediante el diseño y realización de dos prácticas: una convencional y otra en el entorno HILS, en el actual laboratorio de control de procesos, con una muestra de estudiantes del PIAI.

CAPÍTULO 1

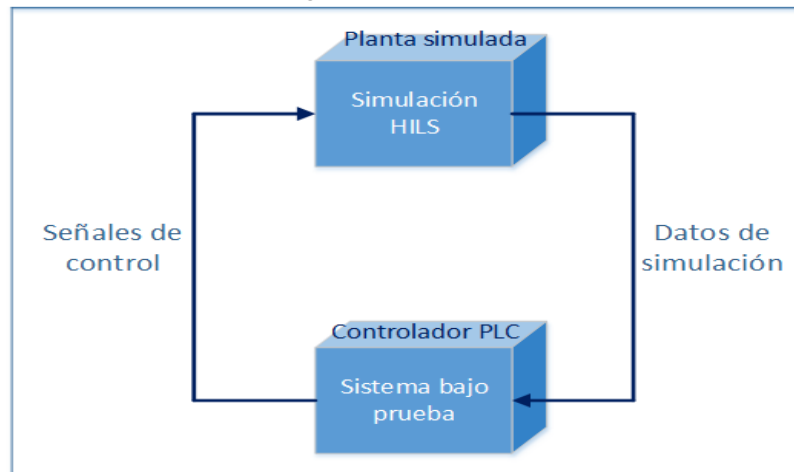
CONTEXTUALIZACIÓN

Este capítulo comprende los conceptos teóricos e información relevante acerca de las diferentes temáticas que se abarcan en el proyecto.

1.1. Hardware in the Loop Simulation

Es un concepto basado en la división de un sistema de control en dos componentes: el de simulación del proceso y el de control (sistema bajo prueba), ver **Figura 1**. Hardware in the Loop Simulation (HILS) utiliza un controlador y una simulación del proceso integrada en un dispositivo físico, con el fin de hacer un control automático en tiempo real. La ventaja principal, es que no es necesario disponer del proceso físico real para probar y validar diferentes estrategias de control en el PLC. Así mismo, HILS permite una experiencia valiosa sobre los problemas y situaciones que los ingenieros pueden enfrentar, como por ejemplo, la sintonización correcta de un controlador, arranques de planta, paradas de emergencia, etc., además, este tipo de entornos proporcionan una plataforma versátil al ofrecer la opción de modificar la complejidad de la planta bajo control, mediante la adición de modelos matemáticos de diferentes sistemas dinámicos relacionados al proceso [3].

Figura 1. Entorno HILS



Fuente. Propia

Su eficiencia se resume en factores como el costo, la duración y la seguridad. Es posible simular partes de un sistema de forma individual, para asegurar que funcionan como estaba previsto, evitando sobrecostos. También, puede ser muy útil, para probar el funcionamiento de un controlador con un proceso simulado antes de que el controlador se aplique al

proceso real (físico). Si el modelo matemático utilizado en el simulador, es una representación exacta del proceso real, se pueden incluso, ajustar los parámetros del controlador (como en el caso de un PID). También sirve para propósitos de entrenamiento, es decir, el operador de un proceso puede aprender su funcionamiento y cómo operarlo, usando la simulación. En cuanto a la seguridad, HILS hace pruebas en condiciones potencialmente peligrosas sin dañar la planta o poner en peligro vidas.

1.2. Estado del arte

La tecnología moderna ha hecho posible explorar el área de control de procesos industriales más a fondo, permitiendo desarrollar e implementar soluciones más efectivas a la hora de manipular un proceso industrial. Anteriormente, costaba trabajo imaginar que un computador lograra realizar innumerables acciones, como por ejemplo simular procesos de la manera más parecida a la realidad, con base a distintas situaciones y elementos.

Por consiguiente, debe ser competencia de la Ingeniería en Automática Industrial el hacer posible la simulación de entornos para el control de procesos industriales a partir de diferentes herramientas computacionales, que brinden una gran ventaja en comparación a los laboratorios tradicionales, especialmente en factores como: complejidad, eficiencia, seguridad, mantenimiento, costos y espacios para su localización.

Para obtener resultados de simulación satisfactorios, se puede utilizar un entorno *Hardware in the Loop Simulation*, que proporcione la interacción de componentes reales y simulados, como si se tratara de una planta real. Un entorno de simulación, brinda gran utilidad en el campo académico enfocado en el entrenamiento y aprendizaje en las áreas de modelado y control de procesos industriales, simulación de nuevas líneas de producción y de condiciones anormales de funcionamiento de una planta, entre otras.

Para mayor claridad, el estudio se divide en dos grandes tópicos, el primero facilita la selección de la planta industrial por medio de la cual se plantea el entorno HILS; y el segundo, esclarece el método de aprendizaje que permitió la validación del entorno. Así:

- Plantas industriales implementadas en entornos *Hardware in the Loop Simulation*.
- Métodos de aprendizaje utilizados en el laboratorio de control de procesos industriales.

Para ello se hace uso de la herramienta de mapeo sistemático para la clasificación de la información, para ver el proceso de mapeo sistemático completo ir al **Anexo A**.

1.2.1. Plantas industriales implementadas en entornos *Hardware in the Loop Simulation*

Para decidir qué entorno HILS implementar, se abordaron los siguientes aspectos:

- Plantas que normalmente se utilizan en HILS para procesos industriales.
- Plataformas software usadas para la implementación de HILS en procesos industriales.
- Experiencias prácticas que se desarrollan a la hora de realizar un entorno HILS en procesos industriales.

El **primer aspecto**, está asociado a las plantas que normalmente se utilizan en HILS para procesos industriales, a continuación, se presentan los resultados de la búsqueda realizada.

En un alto grado de uso en simulación se encuentran las plantas dentro de áreas complejas (centrales térmicas, plantas hidroeléctricas y centrales nucleares), en las cuales debido a sus grandes inversiones económicas y de tiempo no es posible parar un proceso o ensayar cambios en la planta real, por lo tanto, la opción más adecuada es la simulación de la planta.

En un grado medio de uso en simulación, se encuentran las plantas utilizadas en el ámbito académico, en las cuales se plantean diferentes objetivos de estudio dentro de un ambiente de aprendizaje, en este campo se encuentran las siguientes plantas simuladas: de procesos de laboratorios de universidades, de sistemas electro neumáticos, de control de nivel en líquidos, las que involucran motores,

Dentro de un grado medio y bajo de uso en simulación, se encuentran las plantas de algunos sectores industriales particulares (sector minero, petrolero, automotriz y de la robótica), que buscan: probar una nueva estrategia de control, entrenar y capacitar operarios, ensayar cambios y añadir nuevas unidades a la planta. En esta área se encuentran plantas como las de: procesamiento de minerales, procesos petroleros, suministro de combustible industrial, robots industriales y campo automotriz.

Sintetizando la información, a continuación se presenta un listado con el tipo de plantas que actualmente son usadas para realizar entornos HILS, ver **Tabla 1**, para ver el análisis más profundo dirigirse al **Anexo A**.

Tabla 1. Plantas normalmente utilizadas para HILS en procesos industriales.

Planta	Referencia	Planta utilizada en HILS	Variables de proceso	Tipo de proceso	Otras características
P.1	[3] - [4]	Proceso caldera-turbina de una central térmica	La presión del vapor del tambor, la potencia de salida y el nivel del agua	Continuo	Simulación en tiempo real, uso de PLC, comunicación con Ethernet y OPC
P.2	[5]	Planta hidroeléctrica que incluye los subsistemas: hidráulico, regulador y eléctrico	--	Continuo	Uso de PLC, comunicación con Ethernet y OPC
P.3	[6]	Sistema de apagado del Deuterio Uranio Canadiense No.1 (CANDU), que hace parte de una central nuclear	Nivel en el presurizador, nivel y presión en el generador de vapor, presión y flujo en el sistema de transporte de calor primario, flujo y nivel en el núcleo del reactor	Continuo	Uso de PLC, comunicación con Ethernet
P.4	[7]	Sistema de dobles tanques con calefacción y refrigeración	Caudal, nivel, presión y temperatura	--	Señales de 4 a 20 mA, uso de PLC, comunicación con Profibus y puerto serial
P.5	[8]	Sistema electro neumático simple compuesto por: tres cilindros de acción simple, tres válvulas direccionales monoestables asociadas, y dos sensores de posición	Presión	Discreto	Uso de PLC, comunicación RS-232 y uso de RS-422
P.6	[9]	Motor de corriente continua como carga industrial	--	Discreto	Comunicación con Ethernet
P.7	[10]	Planta de motor de corriente continua	Velocidad	--	Comunicación serial, uso de microcontrolador
P.8	[11]	Servo accionamientos de motores de inducción de precisión	Torque, flujo del estator y velocidad del eje	--	Comunicación con RS-232 o Ethernet
P.9	[12]	Sistema de detección de gas y fuego	Nivel de petróleo	Discreto	Alarma de sonido para emergencias, uso de PLC, comunicación por OPC
P.10	[13]	Tanque de agua acoplado a una bomba y dos válvulas: una de entrada y una de salida	Nivel	Continuo	Uso de microcontrolador, simulación en tiempo real
P.11	[14]	Proceso químico Tenesse Eastman, el cual está conformado por cinco unidades: un reactor, un condensador, un separador de vapor-líquido, un compresor y un separador de producto	Temperatura, presión, volumen del líquido y carga de calor	--	Uso de PLC, comunicación con Ethernet
P.12	[1] - [15]	Molienda mineral utilizada en la explotación de minas, conformada por un molino y un nivelador	Peso, tamaño de partículas y tasa de flujo	--	Uso de PLC, comunicación con Ethernet y OPC
P.13	[16]	Proceso de separación compacto submarino	Fracción volumétrica, presión y nivel de líquido	Continuo	Uso de PLC
P.14	[17]	Bomba eléctrica sumergible para la recuperación de petróleo	Flujo y presión	--	Uso de PLC, comunicación con Ethernet y OPC
P.15	[18]	Sistema de compresión de gas combustible industrial, usado para suministrar gas a las turbinas en centrales térmicas de ciclo combinado	Caudal másico y presión	Continuo	Uso de PLC, comunicación TCP/IP
P.16	[19]	Planta compuesta por una caldera que produce vapor sobrecalentado a través de un intercambio de calor	Presión, flujo y temperatura	--	Uso de microcontrolador
P.17	[20]	Manipulador robótico	Posiciones y velocidades de las articulaciones	--	Uso de microcontrolador
P.18	[21]	Línea de prensa automotriz	--	Discreto	PLC

Fuente. Propia

El **segundo aspecto**, hace énfasis en las herramientas software que sirven para la implementación de HILS en procesos industriales. Para la realización de un entorno HILS, es posible encontrar gran cantidad de herramientas, las hay de todo tipo, con mayor o menor funcionalidad, y su utilización depende de qué tantas funciones se deseen implementar, también se encuentran software especializados en HILS, que van desde libres hasta licenciados, en la **Tabla 2** se resume la información acerca de software utilizados actualmente para realizar entornos HILS, para mayor claridad ver **Anexo A**.

Tabla 2. Herramientas software usadas para implementar entornos HILS en procesos industriales.

Entorno HILS	Referencia	Plataforma HILS	Software	Libre	Licenciado
E.1	[3]	Utiliza un modelo caldera-turbina; la estrategia de control se ejecuta en un PLC y se programa a través de STEP 7 de Siemens, que emplea el desarrollo, la supervisión, el diagnóstico y la prueba del código de control. La comunicación PC-PLC se hace mediante un servidor OPC	LabVIEW		X
			STEP 7 de siemens		X
E.2	[4]	Usa: el proceso, una interfaz gráfica de usuario y varios otros subsistemas; el control se implementa utilizando una herramienta de programación de diagrama de escalera (LAD), integrada en el software STEP 7	LabVIEW		X
			STEP 7 de siemens		X
E.3	[5]	Se crea el modelo, se traduce a código C usando Matlab Real-Time Workshop, y se monitorea con un software especializado para la supervisión, llamado Lookout	Matlab/Simulink		X
			Lookout		X
E.4	[6]	DarlSIM, se usa como módulo de simulación de la planta; las variables controladas se transmiten entre el módulo de simulación y el de interfaz a través de Ethernet. Para habilitar la interconexión se utiliza un PC con tarjetas DAQ. Después de la adquisición, las señales son procesadas por un Instrumento Virtual basado en LabVIEW.	DarlSim		X
			LabVIEW		X
E.5	[7]	Basado en el lenguaje Java y el compilador Eclipse	Eclipse	X	
E.6	[8]	Se utiliza CX-One, que permite usar CX-Programmer para editar y simular programas, CX-Designer para crear escenarios de simulación, y Cx-Supervisor, para el monitoreo y el modelo de la planta desarrollado en UPPAAL	CX-One		X
			Cx-Supervisor		X
			UPPAAL	X	
E.7	[18]	El toolbox de Matlab xPC-Target, posibilita modelos de simulación en tiempo real, los cuales se transfieren a un PC a través de la comunicación TCP/IP. El PC ejecutará el modelo, y el controlador enviará las señales de control fundamentándose en la salida del modelo; el algoritmo de control se hará con PCS 7 de Siemens	Matlab xPC-Target		X
			PCS 7		X
E.8	[22]	Se emplea RSLinx como servidor OPC para realizar la comunicación, RSLogix 5000 para implementar la estrategia de control, FactoryTalk View para la supervisión, y CADSIM Plus para crear el modelo de la planta simulada	RSLinx		X
			RSLogix 5000		X
			FactoryTalk View		X
			CADSIM Plus		X
E.9	[23]	Contiene los sensores, actuadores y el proceso técnico real del demostrador. Además, simula la interfaz PROFIBUS DP, que está conectada al controlador de movimiento real, encargado de cerrar el lazo	Siemens Machine Simulator 5.2		X
E.10	[24]	La plataforma SIMBA de IBM, contiene herramientas software útiles para simular plantas con una representación 3D; se trabaja con Orchestra softPLC, elegida como controlador real; se conecta con módulos de control simulados y con la planta usando el protocolo Modbus/TCP	SIMBA		X
			Orchestra control engine		X
E.11	[25]	Estructurado a través de componentes de la empresa Emerson. El modelo dinámico es un proceso de tanques acoplados, integrado al sistema DeltaV Proplus, y descargado en un hardware en tiempo real llamado VIM	Mimic		X
			Delta V		X
E.12	[26]	Se desarrolla el modelo de un tanque. Simulink se usa como cliente OPC y NAOPC server de ICP como servidor, de esta forma se establece la comunicación entre Simulink y la tarjeta de adquisición de datos, a la cual se ingresa la información de la respuesta del modelo, para ser leída y retornar a la simulación	Matlab/Simulink		X
			NAOPC server de ICP		X
E.13	[27]	Permite elaborar la interfaz gráfica y la programación de las variables de proceso, que deben ser acopladas por medio de DAQ's con el PLC	LabVIEW		X
			Easy Java	X	

		Siemens 314, Easy Java Simulation ((EJS) encargada de la interfaz gráfica y el modelado matemático de las plantas, sensores y actuadores) y JILServer (crea el puente entre LabVIEW y EJS)	Simulation		
			JilServer		X
			STEP 7		X
E.14	[28]	Se implementa un controlador PID, diseñado en Matlab y transmitido a LabVIEW, que regula la dinámica de una planta térmica de primer orden embebida en una FPGA (su comunicación con LabVIEW es serial)	Matlab		X
			LabVIEW		X
E.15	[29]	VIRTUOS, simula sistemas de producción con capacidad de tiempo real, y permite la simulación de sistemas dinámicos, además, consta de componentes como: el solucionador VIRTUOS.S, la interfaz para el modelado y seguimiento VIRTUOS.M, y la interfaz gráfica de usuario para la visualización 3D VIRTUOS.V	VIRTUOS		X

Fuente. Propia

En el **tercer aspecto**, se abordan las experiencias prácticas y las habilidades que se desarrollan a la hora de realizar un entorno HILS para procesos industriales, donde se identificaron los siguientes tres puntos claves, en los cuales están principalmente concentradas las investigaciones relacionadas a este aspecto:

- **Enseñanza:** HILS se usa como una herramienta de enseñanza y aprendizaje, para educar en un tema en específico a una población, tanto en el ámbito académico como en el laboral. Basándose en: aprendizaje y modelado para control de procesos [3], [5], [27]; programación y verificación de la lógica implementada en controladores PLC [6], [27]; aumento de experiencia con herramientas software para control y supervisión; manejo de herramientas software para el diseño y el funcionamiento de soluciones de control en sistemas de control distribuido (DCS); comprensión del propósito, la estructura y las propiedades de las herramientas de ingeniería utilizadas en los sistemas de control de los procesos industriales [30]; entrenamiento de operadores de planta, y, ayuda de HILS como herramienta para potencializar el análisis de técnicas de seguridad industrial [7].
- **Mejoramiento del entorno HILS:** se busca el avance, el perfeccionamiento y la divulgación del entorno HILS como herramienta de simulación para procesos industriales, brindando una solución alternativa que combina una parte real con una simulada para obtener mejores resultados. Se hallan aportes en cuanto a: implementación, comparación y validación del método HILS sobre los métodos de simulación clásicos [3], [4]; construcción de librerías de componentes que permitan la simulación de diversas plantas y escenarios de operación [19]; y, construcción de bancos de prueba relacionados con numerosas áreas industriales [8].
- **Simulación de procesos industriales:** se buscan resultados sobre una cuestión en particular en el área de procesos industriales, dentro de esta temática se encuentra: búsqueda de fallos para aumentar los niveles de seguridad en planta [7]; realización de métodos de diagnóstico que permitan la detección de malos funcionamientos de la planta [23]; desarrollo, evaluación y prueba de motores [11]; optimización de sistemas de control con el fin de aumentar el rendimiento de las plantas; y prueba de diferentes esquemas de control para PLC [10], [18], [20].

1.2.2. Métodos de aprendizaje utilizados en laboratorios de control de procesos industriales

Aparte del tipo de plantas y plataformas software usadas actualmente en HILS, es importante para el proyecto, identificar el tipo de estrategias de enseñanza que son utilizadas en mayor medida, y las que mejor se adaptan para instruir en la ingeniería y el control de proceso, teniendo como foco principal los laboratorios en las universidades.

Cada método encontrado, ofrece una forma distinta de implementar el conocimiento teórico que se enseña normalmente en las clases magistrales, y reforzarlo con experiencias prácticas que se viven cuando se ejerce la ingeniería, algunas de estas se basan en ejercicios prácticos o en talleres de laboratorio. En la **Tabla 3**, se resume la información sobre las estrategias de enseñanza asociadas a control de procesos e ingeniería, para más detalles ver **Anexo A**.

Tabla 3. Métodos de aprendizaje utilizados en laboratorios de control de procesos industriales.

Método	Referencia	Descripción
M.1	[31]	Laboratorios virtuales en la enseñanza no presencial mediante entornos de trabajo propios
M.2	[32]	Laboratorios de sistemas introductorios y control mediante proyectos
M.3	[33]	Automatización y control de laboratorios remotos: evaluación de una metodología cooperativa
M.4	[34]	Caso práctico de aplicación de una metodología de enseñanza para laboratorios virtuales
M.5	[35]	Ventana virtual para macrolaboratorios
M.6	[36]	Propuesta pedagógica para el uso de laboratorios virtuales como actividad complementaria en las asignaturas teórico-prácticas
M.7	[37]	Experiencias del uso de laboratorios remotos en la enseñanza de la Automática
M.8	[38]	Docencia presencial y laboratorios remotos, una unión idónea para las prácticas de motores alternativos
M.9	[39]	Educación en control de procesos, usando un laboratorio de separación
M.10	[40]	Laboratorios de control remotos
M.11	[41]	Laboratorio virtual y remoto, utilizando la tecnología de la información como ayuda en la educación
M.12	[42]	Experiencias prácticas sobre la construcción estructurada de laboratorios remotos y virtuales desde el punto de vista del estudiante
M.13	[43]	Realidad aumentada para el mejoramiento de los laboratorios remotos
M.14	[44]	Sistema de aprendizaje para un laboratorio remoto, usando una metodología de ingeniería

Fuente. Propia

1.3. Diagnóstico asociado a las plantas del laboratorio de control de procesos industriales del PIAI

En busca de una opción que permitiera seleccionar la planta con las mejores condiciones, se necesitó ampliar la documentación sobre las plantas del LCP, para ello, se hizo un

diagnóstico de cada una, comprendido por dos procedimientos, uno de descripción y otro de evaluación.

El primer procedimiento, consistió en la extracción de la información sobre las guías actuales del LCP, esto para hacer una ficha técnica de cada planta con sus respectivas descripciones sobre: el proceso, variable manipulada, controlada y de disturbio; esquema de control, instrumentación, plataformas software, guías de laboratorio, problemáticas y cursos que las utilizan, esta información se encuentra consignada en su totalidad en el **Anexo B**.

El segundo procedimiento consistió en realizar un diagnóstico para hallar la planta que presenta mejores condiciones tanto en hardware como en software, para ello, se realizó una evaluación de las plantas a partir del conocimiento de las personas que interactúan y están directamente relacionadas con ellas, haciendo una serie de encuestas a los tres profesores encargados de impartir el curso de laboratorio de control de procesos, a la laboratorista responsable del mismo y a treinta estudiantes que ya finalizaron el curso de laboratorio de control de procesos (estudiantes en pregrado e ingenieros egresados), El formato de las encuestas se encuentra en el **Anexo C** y los resultados completos de la evaluación se puede consultar en el **Anexo Digital A**.

La evaluación del estado de las plantas se hizo con ayuda de tres preguntas, en las dos primeras se presentaron opciones múltiples con única respuesta y cada una tenía un valor específico; las plantas obtenían una nota que dependía de las respuestas seleccionadas por la población de la encuesta, y después, eran organizadas por puntajes. En la tercera pregunta, existieron varias opciones, con selección múltiple, y las respuestas estuvieron asociadas con problemáticas de la planta. Fue así como la de menor número de problemas, se clasificó en el puesto uno, se le dio una buena calificación, y se repitió el proceso con las demás hasta el puesto 6. Cada pregunta se calificó entre 0 y 10, al final se sumaron las calificaciones y se ordenaron las plantas desde la mejor hasta la que evidenció más dificultades.

En este procedimiento, también se incluyeron preguntas de otras temáticas claves para el diagnóstico, buscando así, la constancia de información relevante para el proyecto.

La información recolectada en los dos procedimientos se organizó en cuatro categorías: estado de las plantas, condiciones de las guías de las prácticas, contexto estudiantil y métodos de aprendizaje utilizados.

1.3.1. Estado de las plantas

- **Hardware de las plantas**

El primer procedimiento, permitió la descripción de las plantas que se encuentran funcionando, y de otros elementos hardware que hacen parte del LCP, para ver la información más detallada ir al **Anexo B**.

- **Planta de control de nivel – PCN:** es un sistema propio¹ diseñado para ser una planta multivariable compuesta por un circuito hidráulico, que posee un conjunto de tres tanques interactuantes, conectados tanto en modo serie como en cascada, dependiendo de la apertura o cierre de una serie de válvulas manuales. Sólo uno de los tres tanques interactuantes esta instrumentado. Este tiene medición de: nivel, flujo de entrada y de salida, y manipulación en el flujo de entrada, permitiendo efectuar el control del flujo del agua por el circuito o el control del nivel del agua. También cuenta con la opción de introducir una perturbación en el caudal de entrada.
- **Planta de control de nivel – Amatrol T5552:** enseña dos de los tipos más comunes de sistemas de control de procesos, el nivel de flujo y líquido; y los conceptos sobre los que se basan otros sistemas. La planta incluye una estación de trabajo, una red de control de procesos, un panel de control, una amplia variedad de transductores, válvulas manuales, válvulas solenoides y una servoválvula de control.
- **Planta de presión y flujo de aire – PPFA:** es un sistema propio compuesto por un compresor, un circuito de alimentación de aire a presión, unos filtros, unos reguladores de presión, un circuito neumático, un transmisor ciego de presión, unos indicadores de presión, unos rotámetros, unas electroválvulas, una servoválvula, un transmisor indicador de presión, un controlador de presión, un tanque de almacenamiento de aire a presión y muchos otros dispositivos. La planta se encuentra instrumentada bajo dos escenarios: Automatización Stand Alone y PLC por medio de un Micrologix 1500 de Allen Bradley.
- **Planta de temperatura – PT:** posee un ventilador el cual absorbe aire y lo impulsa por un sistema de resistencias que se encargan de calentarlo, luego, este aire finaliza su recorrido pasando por un conducto cilíndrico. El caudal de aire se puede modificar según la posición de una válvula de persiana; la planta también cuenta con dos sensores de temperatura ubicados a distancias diferentes en el conducto cilíndrico.
- **Planta de control de movimiento – PCM:** es un sistema propio de control de velocidad de un motor de inducción trifásico, que se diseña e implementa en su totalidad en un armario, el cual posee: una fuente de alimentación, un motor jaula de ardilla, un módulo electrodinamómetro, una banda, un tacómetro de mano, cables de conexión, y una caja auxiliar de conexiones.

¹ Propio: se refiere a que la planta fue diseñada e instrumentada como un proyecto dentro del PIAI.

- **Planta multivariable – PM:** es un sistema propio que presenta una dinámica diferente a las plantas existentes en el LCP, que se han enfocado en controlar y monitorear una entrada y una salida (SISO). La planta está compuesta por dos motobombas y cuatro tanques interactuantes, dos de área constante y dos de área variable, sensores de flujo, sensores de nivel, electroválvulas, válvulas manuales y un circuito hidráulico. El sistema, se encuentra conectado a un panel de control compuesto de variadores para modificar la frecuencia de las motobombas, relés electromecánicos y de estado sólido, y una Tarjeta de adquisición de datos National Instruments NI PCI 6221, que recibe y envía señales de mando y monitoreo entre los instrumentos de campo y el tablero de control.
- **Otros:** es necesario aclarar que el LCP del PIAI, cuenta con otra serie de componentes hardware que no están vinculados directamente con ninguna de las plantas presentadas anteriormente, ver **Tabla 4**.

Tabla 4. Elementos hardware no vinculados directamente a las plantas del LCP.

Hardware	Descripción
Red DeviceNet	Proporciona conexión en red de control e información abierta a nivel de dispositivo para dispositivos industriales simples. Admite la comunicación entre sensores y accionadores; y dispositivos de más alto nivel tales como controladores programables y computadoras. Con alimentación eléctrica y señal en un solo cable, ofrece opciones de cableado simples [45].
DH – 485	La red de área local industrial DH-485 está diseñada para aplicaciones de planta y usa el estándar de transmisión RS-485, admite la conexión de hasta 32 dispositivos, incluidos controladores SLC 500 y MicroLogix 1000, terminales gráficos y computadoras personales [46].
Red EtherNet/IP	Proporciona sistemas de red a nivel de toda la planta con el uso de tecnologías de conexión en red abiertas y estándar del sector. Permite control e información en tiempo real en aplicaciones discretas y de proceso continuo, lotes, seguridad, variadores, movimiento y alta disponibilidad. Además admite comunicaciones no industriales e industriales en una infraestructura de red común [47].
PLC ControlLogix 1756	Está montado en un chasis ControlLogix 1756 de 7 E/S brindan una amplia gama de control de movimiento digital, digital de diagnóstico, analógico y E/S. Posee un módulo para la red EtherNet/IP, otro para DH-485 y otro para DeviceNet.
Micrologix 1100	Posee EtherNet/IP incorporado, edición en línea y un panel LCD. El panel LCD incorporado muestra el estado del controlador, el estado de E/S y mensajes del operador simples. Con dos entradas analógicas, diez entradas digitales y seis salidas digitales [48].

Fuente. [45], [46], [47], [48].

El segundo procedimiento permitió la evaluación de las plantas en dos niveles, hardware y software. Esta sección abordó la temática respecto al estado del hardware, para esto, se seleccionó una muestra de 34 participantes (profesores, laboratorista y estudiantes), a los que se les planteó la pregunta: *¿En qué estado funcional se encuentra el hardware de las siguientes plantas?*; se evaluaron seis plantas con cinco opciones de respuesta, con la finalidad de conocer la mejor y en ese orden llegar a la más problemática; se calificaron y

ubicaron las plantas en seis puestos según un puntaje de 0 a 10, así: el primer puesto obtenía 10 puntos, el segundo 8, el tercero 6, el cuarto 4, el quinto 2 y el sexto 0.

Con el propósito de hallar la proporción de personas que seleccionaron una opción, se relacionó el número de personas que eligieron la misma opción, con el número total de personas de la muestra, así:

$$\text{Razón de proporción de personas por opción} = \frac{P}{T}$$

En donde:

P = número de personas que seleccionaron la misma opción

T = número total de personas de la muestra = 34

Esta razón es multiplicada por el peso (K) asignado a la misma, este procedimiento se llamó calificación de la opción (C), y se presenta en (1).

$$C = \frac{P}{T} * K \tag{1}$$

En donde:

C = calificación de la opción.

K = valor de cada opción.

n = número de opciones.

Tabla 5. Número y valor de cada opción de calificación.

n	Opción	K
1	Muy bueno	10
2	Bueno	8
3	Aceptable	6
4	Regular	4
5	Deficiente	2

Fuente. Propia

Teniendo en cuenta que para cada planta hubo múltiples opciones de calificación, y el objetivo fue obtener la calificación total de la planta (C_T), se replanteó la ecuación (1) como una sumatoria para las 5 opciones, tal como se observa en (2).

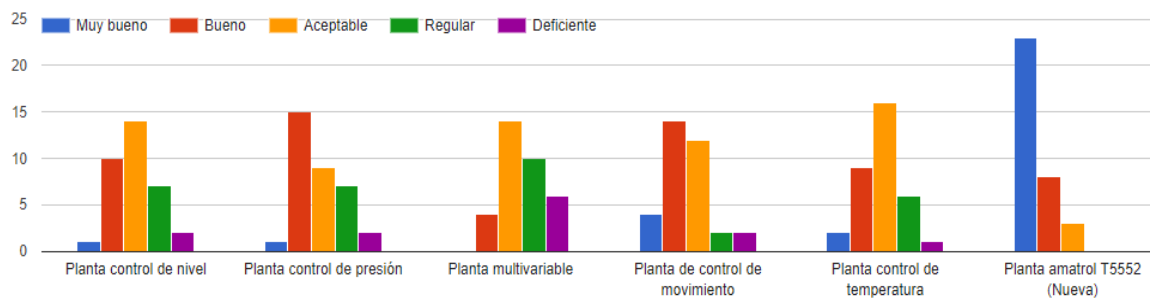
$$C_T = \sum_{n=1}^5 C_n = \sum_{n=1}^5 \frac{P_n}{T} * K_n \tag{2}$$

En donde:

$$C_T = \text{calificación total de la planta}$$

En la **Figura 2** se muestran los resultados que cada planta obtuvo a la pregunta relacionada al hardware, de acuerdo con estos y con la ecuación (2) se calificaron las plantas, ver **Tabla 6**.

Figura 2. Respuestas a: ¿En qué estado funcional se encuentra el hardware de las siguientes plantas?



Fuente. Propia

Tabla 6. Resultados y puestos obtenidos por las plantas respecto al estado hardware.

Calificaciones estado hardware							
Planta	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Regular	Deficiente	Total	Puesto
Nivel	0,29	2,35	2,47	0,82	0,12	5,94	5
Presión	0,29	3,53	1,59	0,82	0,12	6,35	3
Multivariable	0	0,94	2,47	1,18	0,35	4,94	6
Movimiento	1,18	3,29	2,12	0,24	0,24	6,94	2
Temperatura	0,59	2,12	2,82	0,71	0,06	6,29	4
Amatrol	6,76	1,88	0,53	0	0	9,18	1

Fuente. Propia

- **Software de las plantas**

Según el primer procedimiento, se describieron las principales herramientas software que se usan en las prácticas del LCP. La mayoría pertenecen a Rockwell Automation, debido a que fue la solución implementada desde un principio en los laboratorios; sin embargo, existen otros software que han sido utilizados en diferentes actividades como: comunicación, programación, simulación, etc. A continuación, se detallan algunas de las herramientas:

- **RSLinx Classic:** es una solución general de comunicaciones. Ofrece la posibilidad de navegar por la red de autómatas, configurar y diagnosticar dispositivos de red en

una amplia variedad de herramientas Rockwell Software y componentes Allen-Bradley, tales como: RSLogix500, RSLogix 5000 y RSView 32, etc. Del mismo modo, por medio de servidores de datos OPC, facilita que el software de terceras partes pueda acceder a la información dentro de sus dispositivos de control.

- **RSLogix500:** software destinado a la creación de programas de PLC en lenguaje de lógica de escalera (ladder). Incluye editor de ladder y verificador de proyectos, entre otras opciones. Este funciona en los sistemas operativos Windows [49].
- **RSView 32:** es un programa de software basado en Windows para la creación y ejecución de aplicaciones de adquisición de datos, monitoreo y aplicaciones de control. Contiene las herramientas necesarias para formar todos los aspectos de una interface hombre-máquina, incluyendo las pantallas de gráficos animados en tiempo real, tendencias, y resúmenes de alarma [50].
- **FactoryTalk View Site Edition (SE):** es un software de HMI de nivel de supervisión, para supervisar y controlar aplicaciones distribuidas servidor/multiusuario. Proporciona una imagen completa y precisa de las operaciones, satisfaciendo las demandas de múltiples partes interesadas incluyendo ingeniería, mantenimiento, operaciones y producción de Tecnología de la Información, entre otras [51].
- **RSLogix 5000:** es la aplicación utilizada para configurar, programar y mantener toda la familia de controladores Allen-Bradley Logix 5000 y dispositivos relacionados [52].
- **KEPServerEX:** es una plataforma de conectividad, que proporciona una fuente única de datos de automatización industrial a todas sus aplicaciones. El diseño, facilita a los usuarios conectar, administrar, supervisar y controlar dispositivos de automatización, y aplicaciones de software a través de una interfaz de usuario intuitiva. Aprovecha los protocolos de comunicaciones OLE² for Process Control (OPC), y se centra en tecnologías de la información (como SNMP, ODBC y servicios web) [53].
- **CADSIM Plus:** es un software de simulación de procesos químicos, que puede realizar balances de masa y energía, y simular condiciones dinámicas. Es de diseño asistido por computadora (CAD), completo en un solo paquete. Incluye un conjunto de módulos de procesos genéricos, y cuenta con varias bibliotecas opcionales para numerosas aplicaciones [54].

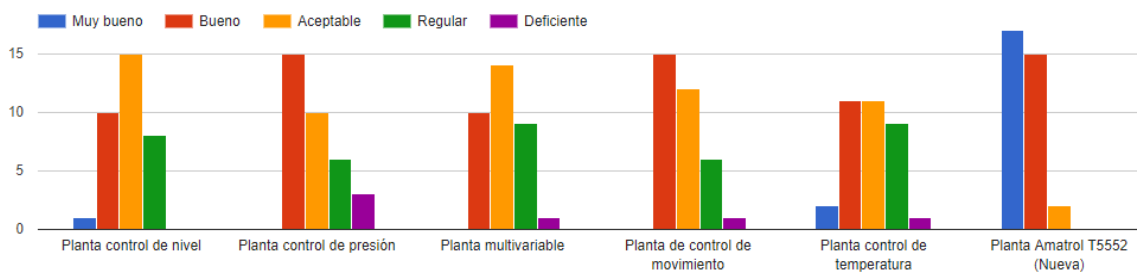
² OLE es un mecanismo que permite a crear y editar documentos que contengan elementos u objetos creados en distintas aplicaciones.

- **Matlab:** es una herramienta de software aritmético que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Entre sus principales servicios se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware [55].

El segundo procedimiento, facilitó la evaluación de las plantas con respecto a su estado software, se realizó el mismo método que para el estado hardware y bajo los mismos parámetros, utilizando la ecuación (2), opciones de calificación y valores, se diferenció en que la pregunta con única respuesta planteada fue: *¿En qué estado funcional se encuentra el software de las siguientes plantas?*

En la **Figura 3**, se muestran los resultados que cada planta obtuvo a la pregunta relacionada al software, en base a estos y la ecuación (2), se calificaron las plantas, ver **Tabla 7**.

Figura 3. Respuestas a: *¿En qué estado funcional se encontraba el software de las siguientes plantas?*



Fuente. Propia

Tabla 7. Resultados y puestos obtenidos por las plantas respecto al estado software.

Resultados estado software							
Planta	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Regular	Deficiente	Total	Puesto
Nivel	0,29	2,35	2,65	0,94	0	6,23	3
Presión	0	3,53	1,76	0,71	0,18	6,18	5
Multivariable	0	2,35	2,47	1,06	0,06	5,94	6
Movimiento	0	3,53	2,12	0,71	0,06	6,41	2
Temperatura	0,59	2,59	1,94	1,06	0,06	6,23	3
Amatrol	5	3,52	0,35	0	0	8,88	1

Fuente. Propia

Y la tercera pregunta fue: *¿Qué tipo de problemas presentan las siguientes plantas?* Se evaluaron seis plantas a partir de siete respuestas, la calificación se obtuvo sumando el número de problemas, la planta con el menor número ocupó el primer puesto, la que tenía el segundo menor número de dificultades el segundo, y así sucesivamente hasta el sexto lugar; se calificó de 0 a 10, así: el primer puesto obtuvo 10 puntos, el segundo 8, el tercero 6, el cuarto 4, el quinto 2 y el sexto 0, ver **Tabla 8**.

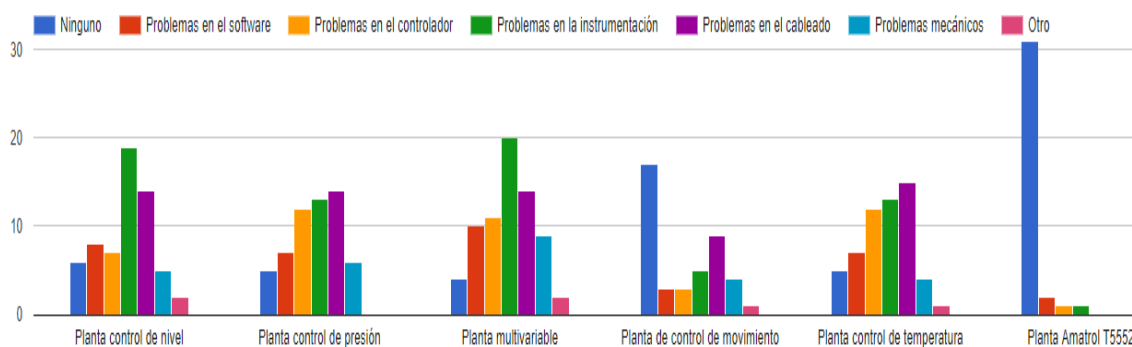
Tabla 8. Calificaciones y puestos obtenidos por las plantas respecto al tipo de problemas.

Número de problemas por planta	Puesto	Puntos
Planta con menor número de problemas	1	10
2da planta con menor número de problemas	2	8
3ra planta con menor número de problemas	3	6
4ta planta con menor número de problemas	4	4
5ta planta con menor número de problemas	5	2
6ta planta con menor número de problemas	6	0

Fuente. Propia

En la **Figura 4**, se exhibe el número de problemas de cada planta, con base a esta se realiza su calificación, ver **Tabla 9**.

Figura 4. Respuestas a: ¿Qué tipo de problemas presentan las siguientes plantas?



Fuente. Propia

Tabla 9. Resultados y puestos obtenidos por las plantas respecto a las problemáticas.

Resultados problemáticas									
Planta	#	Software (%)	Controlador (%)	Instrumntación (%)	Cableado (%)	Mecánicos (%)	Otro (%)	Total (%)	Puesto
Nivel	55	14,55	12,73	34,55	25,45	9,09	3,64	100	5
Presión	52	13,46	23,08	25	26,92	11,54	0		3
Multivariable	66	15,15	16,67	30,30	21,21	16	4		6
Movimiento	25	12	12	20	36	17,39	4,35		2
Temperatura	52	13,46	23,08	25	28,85	7,69	1,92		3
Amatrol	4	50	25	25	0	0	0		1

Fuente. Propia

En la **Tabla 10**, se aprecian los resultados finales de la evaluación de las plantas de acuerdo con las tres preguntas formuladas; la planta que sobresalió ante las demás fue la Amatrol

T5552, ocupando el mejor puesto en los tres casos, esto pudo deberse a que es una planta prácticamente nueva, su instrumentación y software funcionan de la mejor manera, no presenta problemas graves y las pequeñas falencias que posee, no repercuten en el desarrollo de las actividades.

Tabla 10. Resultados del diagnóstico para seleccionar la mejor planta.

Resultados					
Planta	Estado Hardware	Estado Software	Problemas	Total puntos	Puesto
Nivel	5	3	5	10	5
Presión	3	5	3	14	4
Multivariable	6	6	6	0	6
Movimiento	2	2	2	24	2
Temperatura	4	3	3	16	3
Amatrol	1	1	1	30	1

Fuente. Propia

1.3.2. Condiciones de las guías de prácticas

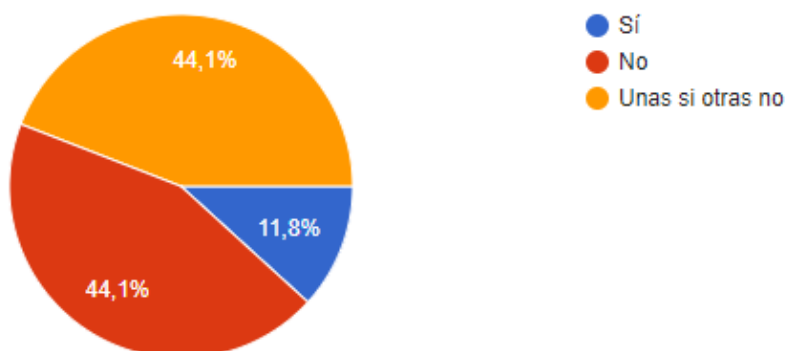
En las prácticas del LCP, se presentó una estructura dividida en tres guías, cada una con un objetivo específico, que se iba encadenando uno a uno hasta alcanzar una meta general en cada planta. De la siguiente forma:

- **Guía 1 - Familiarización y reconocimiento:** el objetivo de esta práctica es hacer un reconocimiento de la instrumentación y del equipo que compone la planta y hacer el levantamiento tanto de planos como de diagramas según las normas ISA
- **Guía 2 - Identificación de la planta:** encontrar el modelo de la planta por medio de procedimientos experimentales que permitan caracterizar el comportamiento estático y dinámico de la planta.
- **Guía 3 - Sintonización de un controlador PID a partir del modelo:** implementar un controlador PID para el control óptimo de la planta, estudiar su comportamiento y los efectos de los disturbios en la variable controlada.

En la encuesta, se presentó una sección orientada a las guías del curso de laboratorio de control de procesos, para esclarecer aspectos relacionados con estas. Se plantearon las preguntas:

- *¿Están actualizadas las guías de laboratorio de las plantas?*, con tres posibles respuestas y contestada por 34 personas, ver **Figura 5**.

Figura 5. Respuestas a: *¿Están actualizadas las guías de laboratorio de las plantas?*



Fuente. Propia

- *¿Las prácticas presentes en las guías están orientadas de acuerdo a las funcionalidades que presentan las plantas?*, con tres posibles respuestas y contestada por 4 personas (laboratorista y tres profesores), ver **Figura 6**.

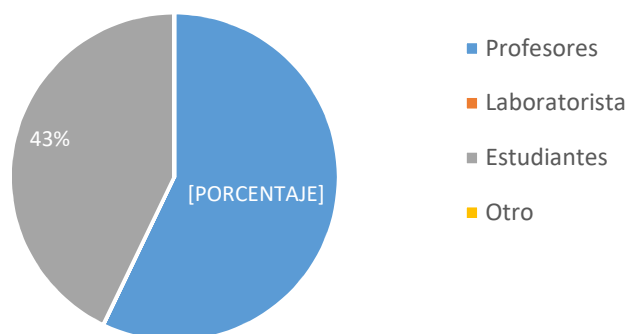
Figura 6. Respuestas a: *¿Las prácticas presentes en las guías están orientadas de acuerdo a las funcionalidades que presentan las plantas?*



Fuente. Propia

- *¿Quién/quienes realizan la actualización de las guías?*, con cuatro opciones de respuesta y contestada por 4 personas (laboratorista y profesores), ver **Figura 7**.

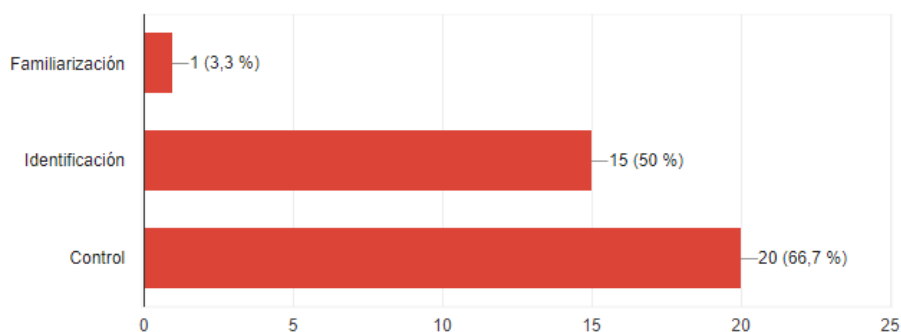
Figura 7. Respuestas a: *¿Quién/quienes realizan la actualización de las guías?*



Fuente. Propia

- *¿Qué sección/es de las guías eran las que mayor esfuerzo académico le exigía?*, fue contestada por 30 estudiantes, por medio de tres opciones de respuesta, ver **Figura 8**.

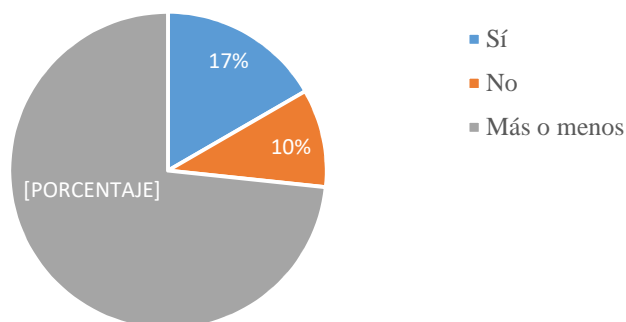
Figura 8. Respuestas a: *¿Qué sección de las guías era la que mayor esfuerzo académico le exigía?*



Fuente. Propia

- *¿Con la información de las guías de laboratorio le era posible realizar satisfactoriamente las prácticas?*, fue contestada por 30 estudiantes, y se presentaron tres opciones de respuesta, ver **Figura 9**.

Figura 9. Respuestas a: *¿Con la información de las guías de laboratorio le era posible realizar satisfactoriamente las prácticas?*



Fuente. Propia

A partir de las preguntas realizadas se pudo extraer las siguientes conclusiones, servirán como punto de referencia para la selección del método de aprendizaje a utilizar.

- Se reconoció que la mayoría de guías estaban desactualizadas, esto puede conllevar a una práctica insatisfactoria donde la guía no refleje el estado actual de la planta y así mismo no explote todo el potencial de esta.
- Se vincularon dos personajes a la creación de la guía, tanto profesores como estudiantes.
- Los estudiantes reflejaron con un 66.7% de las respuestas que la sección final donde se realizaba el control de la planta era la que requería un mayor esfuerzo académico.
- El 73% de encuestados dijeron que la información consignada en la guía en algunos casos no era suficiente como para llevar a cabo la práctica y un 10% directamente dijeron que con esta información no era suficiente, con estos valores se presenta una tendencia negativa hacia las guías, que no terminaban de satisfacer los requerimientos de las prácticas.

1.3.3. Contexto estudiantil

Cursos del PIAI que se apoyan en el LCP

Hay diferentes cursos del PIAI que hacen uso de las plantas del LCP para la realización de sus prácticas, algunos se apoyan en la mayoría de plantas, y otros utilizan algunas en particular. En los próximos apartados se detallan los usos que cada curso hace en el laboratorio:

- **Laboratorio de control de procesos:** vincula de forma práctica las temáticas referentes al control de proceso, basándose en método de aprendizaje a partir de prácticas de laboratorio divididas en tres secciones, familiarización, identificación y control, finaliza el curso con el desarrollo de un proyecto vinculado con alguna planta del laboratorio.
- **Software para aplicaciones industriales II (Sistemas SCADA):** en este se dan los primeros pasos en la enseñanza de herramientas software para procesos de automatización, por lo cual, se parte desde la enseñanza más básica en el manejo de PLC, hasta llegar al control total de una planta.
- **Redes industriales (sistemas de comunicación industrial):** utiliza y explora el potencial de la mayoría de las plantas, ya que se realizan prácticas para interactuar con diversas redes industriales, haciendo necesaria la interconexión de varias plantas y equipos, con el fin de emular un proceso industrial real.
- **Máquinas eléctricas:** se hace uso de la planta de movimiento, en la cual se llevan a cabo distintos experimentos, que permiten conocer los principios generales de los motores, demostrando de forma práctica las teorías impartidas.

1.3.4. Métodos de enseñanza utilizados

De acuerdo con las respuestas dadas por los profesores que imparten o han impartido el curso de laboratorio de control de procesos, se lograron identificar los métodos que han utilizado:

- A la pregunta: *¿Qué tipo de métodos de aprendizaje exige el PIAI, que se implemente en las prácticas de laboratorio?*, todos concordaron en la que está basada en guías de prácticas y están divididas en tres secciones: reconocimiento de la planta, identificación del modelo matemático del proceso y control del proceso, realizadas en un período de un mes; con una rotación conformada por cuatro procesos.
- En la pregunta: *¿Qué tipo de métodos de aprendizaje están implementados en las guías de laboratorio que utiliza?*, se obtuvo como respuesta global que se hace el seguimiento de los pasos expuestos en ellas, para que se logre cumplir el objetivo planteado.
- En la pregunta: *¿Qué tipo de métodos de aprendizaje usted aplica en el laboratorio?*, se consiguieron diferentes, ver **Tabla 11**.

Tabla 11. Respuestas a: ¿Qué tipo de métodos de aprendizaje usted aplica en el laboratorio?

Profesor	Respuestas
1	Un reconocimiento por funcionamiento del dispositivo en marcha, búsqueda en la configuración de los componentes y extracción del modelo matemático por curva de reacción para posteriormente un control
2	Conocimiento general y particular de la planta, aplicación de conceptos
3	Aplicar y leer la teoría del tema y aplicarlo a cada caso en el laboratorio

Fuente. Propio

A partir de las preguntas realizadas se extrae la siguiente conclusión general sobre métodos de aprendizaje, esta servirá como punto de referencia para la selección del que se va utilizar: Se resaltó que las prácticas de laboratorio tienen un método muy bien estructurado, que aumenta el grado de dificultad de manera progresiva, con objetivos claros para cada sesión de trabajo, con la posibilidad de estudiar diferentes procesos industriales, y todo sumado a la experiencia adquirida por medio de las actividades propuestas por los profesores.

CAPÍTULO 2

DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONALIDADES DEL ENTORNO HILS

En este capítulo, se definieron las funcionalidades del entorno HILS, y se formularon tres procedimientos para permitir la implementación del mismo.

2.1. Definición de las funcionalidades del entorno HILS

En esta sección se definen las tareas que el entorno HILS estará en capacidad de hacer, identificando de forma clara el funcionamiento que tendrá al ser desarrollado como un laboratorio virtual de control de procesos para el PIAI, para ello se definieron las siguientes funcionalidades:

- **Entorno HILS desarrollado para experimentar en proyectos de automatización:** ya que HILS es una técnica que se aplica en gran variedad de ámbitos, su uso en el campo industrial representa una pequeña área de lo que se viene trabajando en este entorno, razón por la cual, este trabajo fue netamente orientado a experimentar y acrecentar su utilización en la automatización de procesos, siendo el mejor ejemplo para su vinculación, su uso como una plataforma para la implementación de un laboratorio virtual de control de procesos.
- **Entorno HILS desarrollado para proyectos en los que se trabaja de manera individual:** debido a que uno de los pilares del proyecto fue la realización del entorno a partir de los recursos del PIAI, se planteó un enfoque individual para el mismo por dos motivos; el primero, originado por la limitación de estaciones de trabajo, pues no se cuenta con equipos que tengan las herramientas para construir un sistema distribuido, por ende, el entorno fue embebido en su totalidad en un solo computador, que poseía todas las herramientas necesarias; y el segundo, porque se buscó que todos los estudiantes aprendieran por igual, en ocasiones, cuando el trabajo es grupal, no todos interactúan de forma directa con el entorno.
- **Entorno HILS desarrollado para la enseñanza:** dentro de todas las posibilidades que se logran abordar con HILS, la idea es vincularlo como una herramienta de enseñanza a partir de la cual se brinda una alternativa complementaria en el campo de las prácticas de laboratorio, intentando dar solución a la falta de plantas en el

LCP, y cubriendo dicha carencia, con una experiencia de enseñanza y aprendizaje, fundamentada en una planta virtual similar, pero más completa que las actualmente disponibles.

- **Desarrollo de un entorno HILS en tiempo real:** se optó por una simulación en tiempo real (RT), en donde una planta con un modelo dinámico presenta diferentes estados, a medida que van sucediendo nuevas acciones en el sistema. Durante el proyecto se trabajó bajo el sub-modo *Soft real-time* (SRT), definido en [3], como un plazo de tiempo impuesto por el diseñador, en el que los límites no son tan estrictos y a veces, la violación es aceptable. El uso del entorno HILS requiere la comunicación entre sus dos componentes (real-simulado), pasando por varios componentes hardware y herramientas software que vinculan una posibilidad de retardos en el sistema, por tanto, se implementa SRT para no limitar la solución HILS.

2.2. Procedimiento para seleccionar el entorno HILS a implementar

Después de definir las funcionalidades, se seleccionó el entorno HILS que cumplió con las mismas, para ello se propuso un procedimiento en tres etapas de diseño:

- Elección del tipo de proceso y planta de laboratorio, utilizados como caso de estudio para implementar el entorno HILS.
- Elección de método de aprendizaje para realizar la evaluación, y comparación del laboratorio virtual soportado en HILS, con uno convencional.
- Diseño de las características del entorno HILS que permiten la implementación y puesta en marcha de este

2.2.1. Elección del tipo de proceso y planta de laboratorio utilizado como caso de estudio

Se hizo la elección de la planta tipo a partir del análisis de las plantas industriales usadas en entornos HILS de la **sección 1.2.1**; después se contrastó con las plantas del LCP del PIAI, con el fin de elegir la planta con mayor semejanza en sus características con la planta tipo.

- **Proceso de selección de la planta tipo**

Se propusieron una serie de criterios, determinados por los presentes autores, acordados según las necesidades que debía cumplir la planta a utilizar, estos fueron aplicados a las plantas industriales clasificadas en la *Tabla 1* de la **sección 1.2.1**. Ver **Tabla 12**.

Tabla 12. Criterios de evaluación de la planta tipo.

Etiqueta	Criterios	Puntuación	
C.1	¿Tiene la documentación de diseño, construcción e implementación de la planta?	Si no cumple 0% - Si cumple 100% del porcentaje asignado	
C.2	¿Tiene la planta un número significativo de variables de proceso?	5 variables	100%
		4 variables	80%
		3 variables	60%
		2 variables	40%
		1 variable	20%
		0 variables	0%
C.3	¿La planta hace uso de un PLC para su estrategia de control?	Si no cumple 0% - Si cumple 100%	
C.4	¿La planta presenta una riqueza en el tipo de proceso, potencialidades de algoritmos y estrategias experimentales?	Más de una estrategia de control, una variable de control y una red de comunicación	100%
		Tiene una estrategia de control, una variable de control y una red de comunicación	50%
		No permite hacer el control del proceso.	0%
C.5	¿La planta tiene la misma variable de proceso que alguna planta del LCP?	4 variables o mas	100%
		3 variables	75%
		2 variables	50%
		1 variable	25%
		0 variables	0%

Fuente. Propia

Los criterios planteados previamente consistieron en:

- **C.1:** señala la disponibilidad de una completa documentación de la planta, haciendo más fácil la representación y la emulación de dicho proceso industrial.
- **C.2:** se asocia a la cantidad de variables que se encuentran presentes en el proceso industrial que representa la planta, entre mayor cantidad posea mayor será su calificación
- **C.3:** indica que el controlador del proceso es un PLC, debido a que es el mecanismo de control utilizado en la mayoría de plantas del LCP.
- **C.4:** hace referencia al potencial que tiene la planta para utilizar diferentes estrategias de control, manejar distintas variables y experimentar con varios estados de la planta.
- **C.5:** demuestra que la planta evaluada presenta la misma variable controlada que alguna de las plantas del LCP, de forma que más adelante, se facilite la comparación entre el entorno HILS propuesto con una planta del LCP.

A continuación, se calcula el porcentaje de cada criterio de selección de la planta tipo, estos fueron asignados individualmente por los presentes autores. Luego, se procesaron para definir el nivel de importancia de cada criterio evaluado, ver **Tabla 13**.

Tabla 13. Asignación y cálculo de porcentajes a los criterios de evaluación de la planta tipo.

Crterios	Evaluador 1 (%)	Evaluador 2 (%)	Evaluador 3 (%)	Suma (%)	Ponderado (%)
C.1	15	15	20	50	16,67
C.2	20	25	20	65	21,67
C.3	10	10	20	40	13,33
C.4	20	10	25	55	18,33
C.5	35	40	15	90	30
Total	100	100	100	300	100

Fuente. Propia

Se llevó a cabo la evaluación de las plantas industriales clasificadas en la **Tabla 1**, de la **sección 1.2.1**, respecto a los criterios de evaluación anteriormente establecidos, ver **Tabla 14**.

Tabla 14. Evaluación de las plantas tipo acorde a los criterios.

Planta	C.1 (%)	C.2 (%)	C. 3 (%)	C. 4 (%)	C.5 (%)	TOTAL (%)
P.1	16,67	13	13,33	6,67	7,5	57,17
P.2	0	4,33	13,33	6,67	7,5	31,83
P.3	0	21.67	13,33	6,67	7,5	49,17
P.4	16,67	17.34	13,33	6,67	22,5	76,51
P.5	0	4,33	13,33	6,67	7,5	31,83
P.6	0	4,33	0	6,67	0	11
P.7	16,67	4,33	0	6,67	0	27,67
P.8	16,67	13	0	6,67	0	36,34
P.9	0	4,33	13,33	6,67	7,5	31,83
P.10	16,67	4,33	0	6,67	7,5	35,17
P.11	0	17.34	13,33	6,67	15	52,34
P.12	16,67	13	13,33	6,67	0	49,67
P.13	16,67	13	13,33	6,67	15	64,67
P.14	16,67	8,67	13,33	6,67	15	60,34
P.15	16,67	8,67	13,33	6,67	7,5	52,84
P.16	0	13	0	6,67	22,5	42,17
P.17	16,67	8,67	0	6,67	0	32,01
P.18	--	--	--	--	--	--

Fuente. Propia

La planta tipo mejor evaluada fue la P.4 del proyecto “*Soluções HILS baseadas em FOSS para treinamento e supervisão em controle de processos industriais*” [7], de la Universidad Federal de Juiz de Fora, la cual cumplió con la mayoría de los criterios requeridos, con un porcentaje de 76.51. Es un sistema de tanques dobles con calefacción, refrigeración y control de variables (caudal, nivel, presión y temperatura) en un solo circuito, configurado para topologías distintas. Esta será la planta referencia para la elección de la planta del LCP implementada en el entorno HILS.

- **Proceso de selección de la planta del LCP para el entorno HILS**

Dentro de las plantas del LCP, se buscó elegir la de mayor semejanza a la planta tipo. La **Tabla 15** presenta los criterios de comparación de las plantas del LCP con la planta tipo.

Tabla 15. Criterios de comparación para las plantas del LCP.

Etiqueta	Criterios	Puntuación	
C.1	¿La planta presenta un sistema de dos o más tanques?	Si no cumple 0% - Si cumple 100% del porcentaje asignado	
C.2	¿La planta permite el control de diferentes variables de proceso?	4 variables	100%
		3 variables	75%
		2 variables	50%
		1 variable	25%
		0 variables	0%
C.3	¿Opera basada en la estandarización de señales de 4 a 20 mA?	Si no cumple 0% - Si cumple 100% del porcentaje asignado	
C.4	¿Existen lazos que permiten el control independiente de las variables de control?	Si no cumple 0% - Si cumple 100% del porcentaje asignado	
C.5	¿Qué puesto ocupó la plantaJ en el diagnóstico asociado a las plantas del capítulo 1?	1er puesto	100%
		2do puesto	80%
		3ro puesto	60%
		4to puesto	40%
		5to puesto	20%
		6to puesto	0%

Fuente. Propia

Los criterios consistieron en:

- **C.1:** indica la presencia de tanques dentro de la planta, que permitan el uso de variables como el nivel y el flujo.
- **C.2:** se refiere a la cantidad de variables de proceso que se pueden controlar.
- **C.3:** señala la utilización del método de transmisión de señales de 4 a 20 mA, por parte de la instrumentación de la planta.

- **C.4:** hace mención a la existencia de lazos de control independientes, que permiten trabajar con una variable de forma individual.
- **C.5:** muestra el lugar que la planta ocupó en la evaluación realizada, por medio de la de la sección: diagnóstico de las plantas, del capítulo 1.

A continuación, se calculó el porcentaje de cada criterio de comparación entre la planta tipo y las del LCP. Se realizó la suma de los valores que cada planta obtuvo. Ver **Tabla 16**.

Tabla 16. Asignación y cálculo de porcentajes para los criterios de comparación de las plantas del LCP.

Criterios	Evaluador 1 (%)	Evaluador 2 (%)	Evaluador 3 (%)	Suma (%)	Ponderado (%)
C.1	30	30	15	75	25
C.2	10	15	25	50	16,67
C.3	20	10	25	55	18,33
C.4	20	20	25	65	21,67
C.5	20	25	10	55	18,33
Total	100	100	100	300	100

Fuente. Propia

Se hizo la comparación de las plantas del LCP con la planta tipo, respecto a los criterios anteriormente establecidos, y posteriormente se realizó la suma de los valores que cada planta obtuvo, ver **Tabla 17**.

Tabla 17. Comparación de las plantas del LCP y la planta tipo de acuerdo a los cinco criterios.

Planta	C.1 (%)	C.2 (%)	C.3 (%)	C.4 (%)	C.5 (%)	TOTAL (%)
Planta Amatrol	25	8.33	18.33	21.67	18.33	91.66
Planta movimiento	0	4.17	18.33	0	14.67	37.17
Planta nivel	25	4.17	18.33	0	11	58.5
Planta temperatura	0	4.17	18.33	0	7.33	29.83
Planta presión	0	4.17	18.33	0	3.67	26,17
Planta multivariable	25	4.17	18.33	21.67	0	69.17

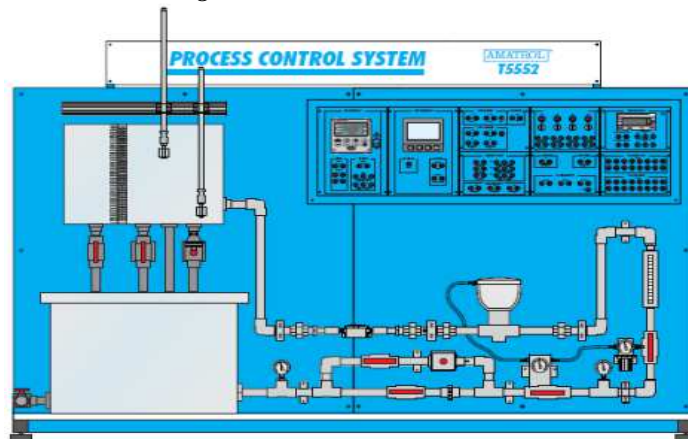
Fuente. Propia

La planta del LCP mejor evaluada fue la planta Amatrol T5552, la cual cumplió con la mayoría de los criterios requeridos, con un porcentaje de 91.66%. Debido a que la planta tipo en el caso de estudio [7] realizó el control de nivel, utilizando el nivel como variable controlada, y el flujo como variable manipulada, se decide hacer uso de este mismo criterio de diseño para el desarrollo del entorno HILS.

2.2.2. Descripción de la planta de laboratorio Amatrol T5552

La planta de nivel y flujo, Amatrol T5552, ver **Figura 10**, es un circuito hidráulico de tres recorridos con varios tanques y una motobomba, con un sistema neumático y la instrumentación necesaria para efectuar el control de flujo o nivel; se hace circular líquido del tanque de almacenamiento, hacia el tanques de proceso de compartimento dual, bajo el impulso de la motobomba. Además, el líquido retorna al tanque de almacenamiento, por acción de la gravedad [56].

Figura 10. Planta Amatrol T5552.



Fuente. [57]

El T5552 incluye un panel de control e instrumentos industriales montados y cableados en un armario-panel, para controlar el flujo de líquido entre dos tanques o el nivel de líquido en un tanque; este permite medir señales y conectar los dispositivos en una amplia variedad de configuraciones de control, así mismo, ofrece tres tipos de controladores: control por relé y un controlador tipo PID. El control por relé posee interruptores manuales de entrada, válvulas de solenoide, y flotadores para realizar el encendido o apagado automático de control de nivel de líquido. El controlador PID, contribuye al control programado de cualquiera de los niveles de líquido o flujo. En el **Anexo D**, aparece la descripción completa, en conjunto con los modelos de la norma ISA S88 de planta y sus diagramas PFD y P&ID.

2.2.3. Elección del método de aprendizaje a utilizar

De acuerdo al diagnóstico y al estado del arte elaborado en la **sección 1.2.2**, el método usado en este proyecto, debía permitir una correcta evaluación y comparación del laboratorio virtual soportado en un entorno HILS con un LCP convencional. En consecuencia, la selección se hizo por medio de varios criterios que condujeron a la adecuada, ver **Tabla 18**.

Tabla 18. Criterios de evaluación para el método a utilizar

Etiqueta	Criterios	Puntuación
C.1	¿Fomenta el autoaprendizaje?	Si no cumple 0% - Si cumple 100% del porcentaje asignado
C.2	¿Asegura una enseñanza práctica de la ingeniería?	
C.3	¿Utiliza una plataforma de enseñanza presencial?	
C.4	¿Posee un procedimiento práctico que pone a prueba el fundamento teórico?	

Fuente. Propia

Los criterios consisten en:

- **C.1:** estimula a los estudiantes para que sean proactivos, de tal manera que se esfuercen por adquirir conocimientos por sí mismos.
- **C.2:** plantea una parte práctica, que posibilita el acceso a conocimientos con base en la experiencia
- **C.3:** vincula el trabajo presencial, haciendo necesaria la interacción con el escenario de aprendizaje.
- **C.4:** el método permite implementar los conceptos teóricos de la temática tratada.

A continuación, se muestra el cálculo del porcentaje de cada criterio para la selección del método de aprendizaje, ver **Tabla 19**.

Tabla 19. Asignación y cálculo de porcentajes para los criterios de evaluación de los métodos de aprendizaje

Criterios	Evaluador 1 (%)	Evaluador 2 (%)	Evaluador 3 (%)	Suma	Ponderado
C.1	30	35	40	105	35
C.2	40	35	20	95	31.66
C.3	20	10	20	50	16.67
C.4	10	20	20	50	16.67
Total	100	100	100	300	100

Fuente. Propia

Luego de la ponderación, se llevó a cabo la evaluación de métodos de aprendizaje clasificados en la **Tabla 3**, de la **sección 1.2.2**, respecto a los criterios de evaluación anteriormente establecidos, ver **Tabla 20**.

Tabla 20. Evaluación de los métodos.

Método	C.1 (%)	C.2 (%)	C.3 (%)	C.4 (%)	TOTAL (%)
M.1	35	31,66	0	16,67	83,33
M.2	35	31,66	16,67	0	83,33
M.3	35	31,66	0	16,67	83,33
M.4	35	31,66	16,67	16,67	100
M.5	35	31,66	0	16,67	48
M.6	35	31,66	16,67	0	83,33
M.7	0	31,66	0	16,67	48,33
M.8	35	31,66	0	16,67	83,33
M.9	35	31,66	0	16,67	83,33
M.10	35	31,66	0	16,67	83,33
M.11	35	31,66	0	0	66,66
M.12	0	31,66	0	16,67	83,33
M.13	35	31,66	0	0	66,66
M.14	0	31,66	16,67	16,67	65

Fuente. Propia

El método mejor evaluado fue el **M.4** del proyecto “*Un caso práctico de aplicación de una metodología de aprendizaje para laboratorios virtuales*” [34], la cual cumplió con la mayoría de los criterios requeridos, con un porcentaje de 100%. Este método propone el desarrollo de prácticas de laboratorio mediante diferentes guías que ayuden al estudiante a entender, contextualizar y desarrollar las actividades de un laboratorio virtual.

2.2.4. Descripción del método de aprendizaje

Este método propone el desarrollo de prácticas de laboratorio, las cuales son un espacio de aprendizaje en donde se desarrollan y adquieren destrezas que permiten establecer criterios de ingeniería, comprobar, y en muchos casos entender, los conceptos teóricos que se deben aprender en varias asignaturas [34].

Este método se aplicó en la validación del laboratorio virtual mediante la realización de prácticas de laboratorio y su posterior evaluación con examen de conocimientos. Se realizaron tres pruebas experimentales en la misma temática (vinculadas a tres prácticas), aunque implementadas con variaciones. Cada prueba estuvo orientada por una guía dividida en cinco secciones: introducción, objetivo, prerrequisitos, fundamentos teóricos y procedimiento.

Cada sección se desarrolla de la siguiente manera:

- *Introducción*: se habla sobre el tema y la síntesis de la práctica para preparar y familiarizar a los estudiantes.

- *Objetivo:* propone la meta que se desea lograr en la práctica.
- *Prerrequisitos:* son conocimientos y destrezas que los estudiantes deben tener previo a la realización de la práctica.
- *Marco teórico:* fundamentos teóricos a ser abordados.
- *Procedimiento:* detalla los pasos a seguir durante la práctica.

Una vez finalizadas las practicas se necesitaba obtener resultados del desempeño de los estudiantes, para ello se realizó un examen de conocimientos.

Este método también se aplicó para el diseño de tres guías para el uso del laboratorio virtual por parte de los estudiantes del curso de laboratorio de control de procesos y el de redes industriales, se diseñó una guía para la práctica de identificación del modelo de la planta virtual Amatrol, ver **Anexo I**, otra guía para la práctica de control de nivel para la planta virtual Amatrol, ver **Anexo H** y una guía para la práctica de comunicaciones mediante protocolo Ethernet/IP y servidor OPC, ver **Anexo J**.

2.2.5. Elección del entorno HILS

Para la selección del entorno HILS apropiado, fueron definidos criterios de evaluación por los presentes autores, ver **Tabla 21**, teniendo en cuenta: los recursos disponibles en el LCP del PIAI, las plataformas software para la implementación de entornos HILS, el tipo de proceso y la planta seleccionada.

Tabla 21. Criterios de evaluación del entorno HILS.

Etiqueta	Criterios	Puntuación	
C.1	¿Hace uso de ecuaciones matemáticas para obtener el modelo de la planta?	Si no cumple 0% - Si cumple 100% del porcentaje asignado	
C.2	¿Realiza la implementación del entorno HILS en tiempo real?		
C.3	¿El entorno HILS hace uso de los recursos del PIAI?	Si se desarrolla únicamente con las herramientas disponibles.	100%
		Si hay un recurso reemplazable por otro del PIAI.	50%
		Si no hace uso de ningún recurso.	0%
C.4	¿Proporciona los modelos matemáticos de los instrumentos y su representación gráfica?	Si no cumple 0% - Si cumple 100% del porcentaje asignado	

Fuente. Propia

Los criterios consisten en:

- **C.1:** realización del modelo de la planta de forma detallada gracias a su modelo matemático, aumentando el grado de precisión del que va a ser simulado, con respecto al de la planta real.
- **C.2:** hace referencia al tiempo de respuesta que le toma al sistema, reflejar los cambios producidos en el supervisorio, por acciones del usuario sobre el sistema de control, de tal manera que el entorno tenga una fluidez adecuada.
- **C.3:** el entorno debe ser desarrollado a partir de los recursos disponibles en el PIAI, por ende, se deben utilizar los elementos hardware y herramientas software disponibles actualmente.
- **C.4:** el modelo de la planta es elaborado en una herramienta software de forma gráfica, apoyándose en modelos matemáticos y representaciones gráficas preestablecidas por la herramienta.

A continuación, se calculó el porcentaje de cada criterio para la selección del entorno HILS, estos fueron asignados individualmente por los presentes autores. Luego, se procesaron para definir el nivel de importancia de cada criterio evaluado, ver **Tabla 22**.

Tabla 22. Niveles de prioridad de los criterios de evaluación del entorno HILS.

Criterios	Evaluador 1 (%)	Evaluador 2 (%)	Evaluador 3 (%)	Suma (%)	Ponderado (%)
C.1	25	30	30	85	28.33
C.2	15	20	20	55	18.33
C.3	45	40	30	115	38.34
C.4	15	10	20	45	15
Total	100	100	100	300	100

Fuente. Propia

Luego de la ponderación, se llevó a cabo la evaluación de los entornos clasificados en la **Tabla 2** de la **sección 1.2.1**, respecto a los criterios de evaluación anteriormente establecidos, ver **Tabla 23**.

Tabla 23. Evaluación de los entornos HILS.

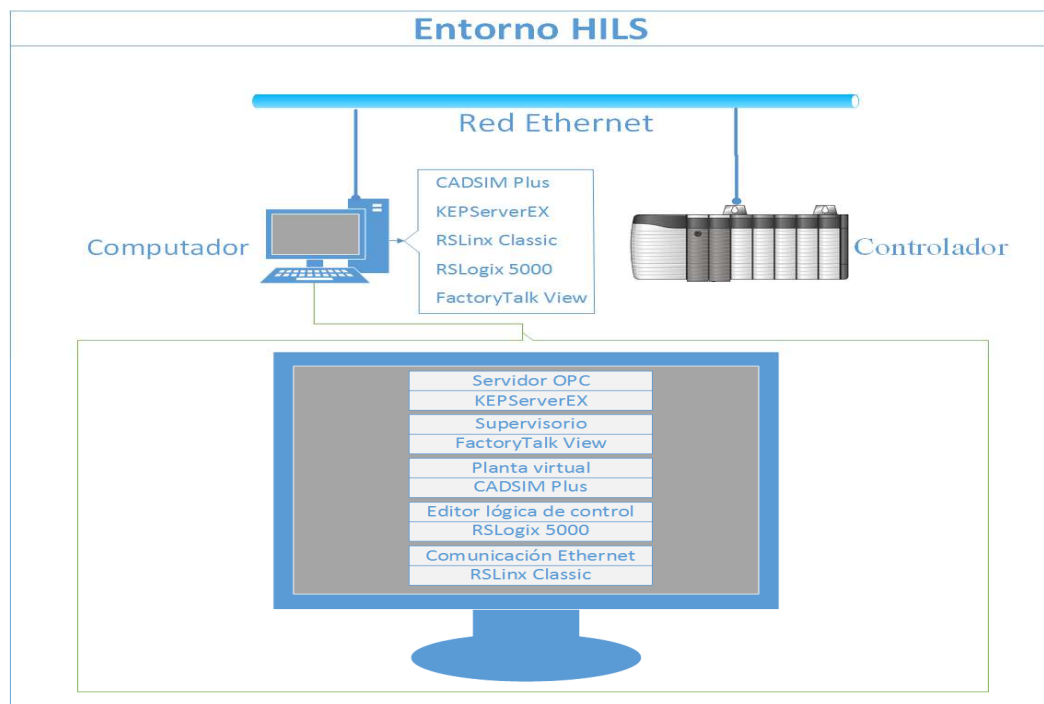
Entorno HILS	C.1 (%)	C.2 (%)	C. 3 (%)	C. 4 (%)	TOTAL (%)
E.1	28.33	18.33	19,17	0	65,83
E.2	28.33	18.33	19,17	0	65,83
E.3	28.33	18.33	0	0	46,66
E.4	28.33	18.33	0	0	46,66

E.5	28,33	18,33	19,17	0	65,83
E.6	28,33	18,33	0	0	46,66
E.7	28,33	18,33	19,17	0	65,83
E.8	28,33	18,33	38,34	15	100
E.9	28,33	18,33	0	0	46,66
E.10	0	18,33	0	0	18,33
E.11	28,33	18,33	0	0	46,66
E.12	28,33	0	19,17	0	47,5
E.13	28,33	18,33	0	0	46,66
E.14	28,33	18,33	0	0	46,66
E.15	28,33	18,33	0	0	46,66

Fuente. Propia

El entorno HILS mejor evaluado fue el E.8 del trabajo “*Planta virtual BATCH con integración empresarial en la categoría administración de producción*” [22], el cual cumplió con la mayoría de los criterios requeridos, con un 100%. Este entorno obedece a una estructura en la cual la planta simulada, la supervisión, la edición de la lógica de control y las comunicaciones se encuentran en un mismo computador, este computador se comunica a través de la red Ethernet con un PLC. Para los modelos matemáticos y representación gráfica de la planta se utiliza CADSIM Plus, para la supervisión FactoryTalk View de Rockwell Automation Software, para la comunicación por OPC, KEPServerEX, para la configuración de la red Ethernet, RSLinx Classic y como PLC, el ControlLogix 1756-L61 de Rockwell Automation, ver **Figura 11**.

Figura 11. Estructura y herramientas software del Entorno HILS a implementar.



CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACION DEL LABORATORIO VIRTUAL SOPORTADO EN EL ENTORNO HILS

En este capítulo, se implementó el entorno HILS, se expuso su arquitectura, su diseño previo, la implementación paso a paso, su prueba previa y ajustes.

3.1. Arquitectura del entorno HILS propuesto

De acuerdo a la **sección 2.2.5**, el entorno HILS está soportado en tres grandes componentes Hardware: un computador, una red Ethernet y un PLC. Las funciones de cada componente están distribuidas así: el componente computador se hace responsable de las funciones de simulación, edición de lógica de control, supervisión y comunicación, el componente red Ethernet se hace cargo de la conexión PC – PLC y el componente PLC se hace cargo de las funciones de control, a continuación, se describe la funcionalidad de cada componente.

3.1.1. Elementos de la arquitectura

- **Componente PLC:** encargado de realizar el control del proceso, se utilizó un PLC ControlLogix 1756-L61 de Rockwell Automation, el cual está compuesto por un chasis de 7 slots, en el slot 0 contiene un procesador ControlLogix 5561, en el slot 1 contiene el módulo 1756-DNB/E DeviceNet, en el slot 2 tiene el módulo 1756 DH-485, en el slot 3 contiene un módulo de interfaz Ethernet 1756-ENBT.
- **Componente red Ethernet:** a este se conecta el PLC y el computador, es una red de área local con una velocidad de transmisión de hasta 10 Mbps, emplea el protocolo de comunicación TCP/IP, dicha conexión se puede realizar bajo dos escenarios: red LAN institucional o red LAN privada. En la red privada se crea una LAN a partir de la conexión de los componentes PC y PLC a un switch, la diferencia entre los dos escenarios radica en la velocidad de transmisión y la latencia, debido a que la red propia no tiene un uso masivo tendrá una menor ocupación representada en una mayor velocidad de transmisión y menor latencia respecto a la red institucional.
- **Componente computador:** este contiene las herramientas software a partir de las cuales se va a establecer el entorno HILS, como simulador emplea CADSIM Plus, como motor de comunicaciones RSLinx Classic, como servidor OPC usa KEPServerEX, como editor de la lógica de control RSLogix 5000 y como encargado de la supervisión FactoryTalk View.

A continuación, se detallan de forma individual cada función del componente computador:

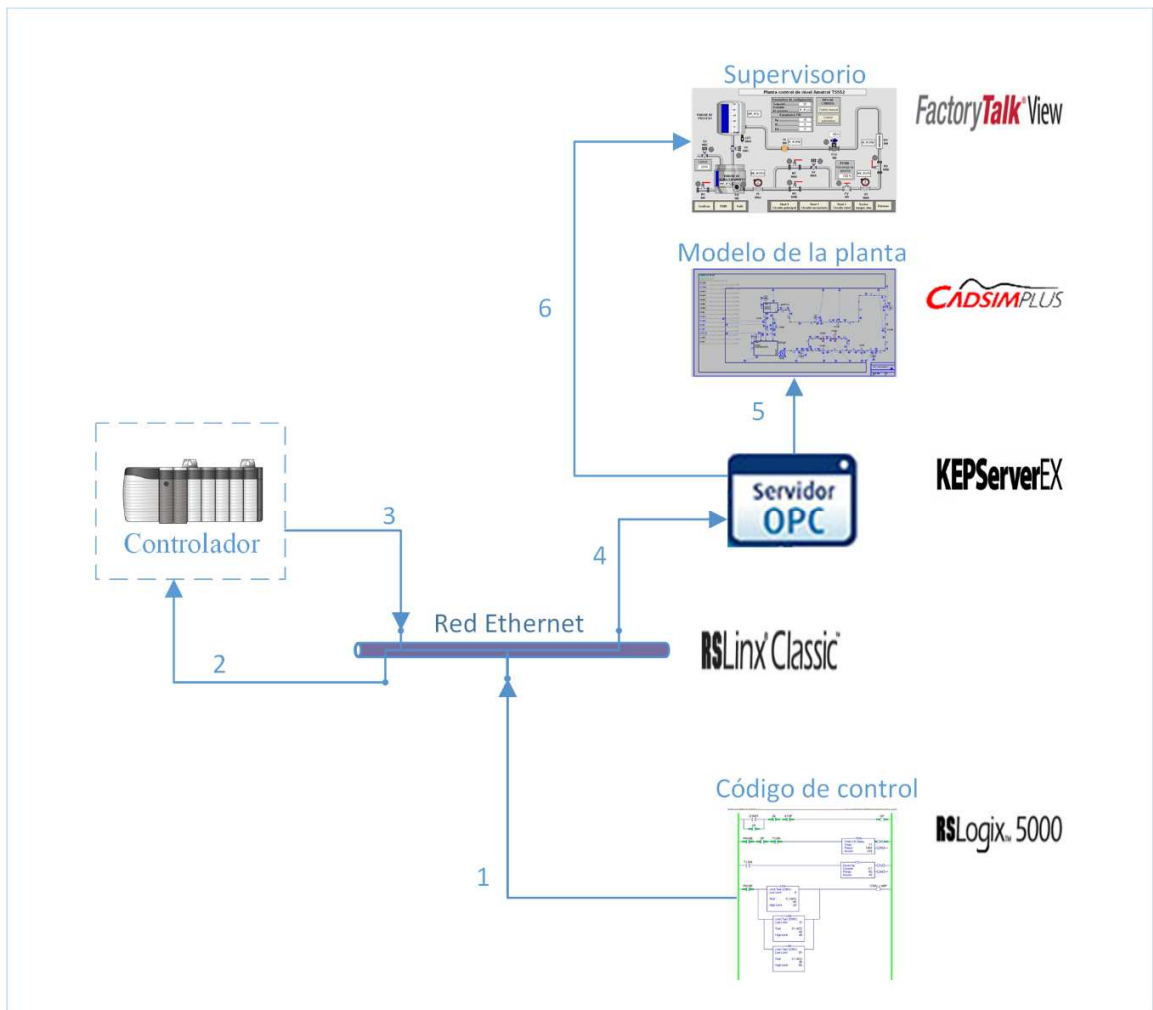
- **Simulación:** se realizó en CADSIM Plus, se emuló el comportamiento de la planta y se plasmó en un modelo gráfico, realizado apoyándose en modelos matemáticos de unidades y representaciones gráficas preestablecidas por la herramienta.
- **Supervisión:** esta parte se diseñó en FactoryTalk View, en ella se creó el supervisor en el cual se realiza el monitoreo y control del proceso, el cual a través del servidor OPC está conectado con el modelo de la planta y el controlador.
- **Edición de la lógica de Control:** se creó en la aplicación RSLogix 5000, a partir de lenguaje de escalera se plasmó la lógica de control para posteriormente ser descargada al PLC.
- **Comunicaciones:**
 - **Comunicación Ethernet:** apoyándose en la red Ethernet de la universidad del Cauca se hizo la conexión física del computador y el PLC, la configuración del driver de comunicación Ethernet se creó a través de RSLinx Classic, el cual permitió vincular el computador con el PLC, para posteriormente enlazar el PLC con el editor de la lógica de control y el servidor OPC.
 - **Comunicación OPC:** se estableció KEPServerEX como servidor OPC, permitiendo conectar, administrar, supervisar y controlar las variables del proceso desde y hacia las distintas herramientas software.

Para identificar el flujo de datos en el entorno HILS es necesario realizar el enlace de estos entre las distintas herramientas software.

3.1.2. Interconexión de elementos de la arquitectura

El primer paso inicia con la creación de las tags del proceso y el código que contiene la lógica de control en la herramienta RSLogix 5000, el código es descargado al PLC a través de la red de comunicaciones Ethernet (1) que se configura con RSLinx Classic; cuando el código de control llega al PLC (2), se exportan las tags desde el PLC gracias a un envío de datos por medio de la red Ethernet (3) hacia un servidor OPC (KEPServerEX) (4), después, las tags se vinculan con las del modelo de la planta virtual creado en CADSIM Plus (5), por último, se vinculan las tags existentes en el servidor OPC con la aplicación de supervisión creada en FactoryTalk View (6), terminando así, la interconexión de elementos, ver **Figura 12**.

Figura 12. Procedimiento de interconexión de elementos en la arquitectura del entorno HILS.

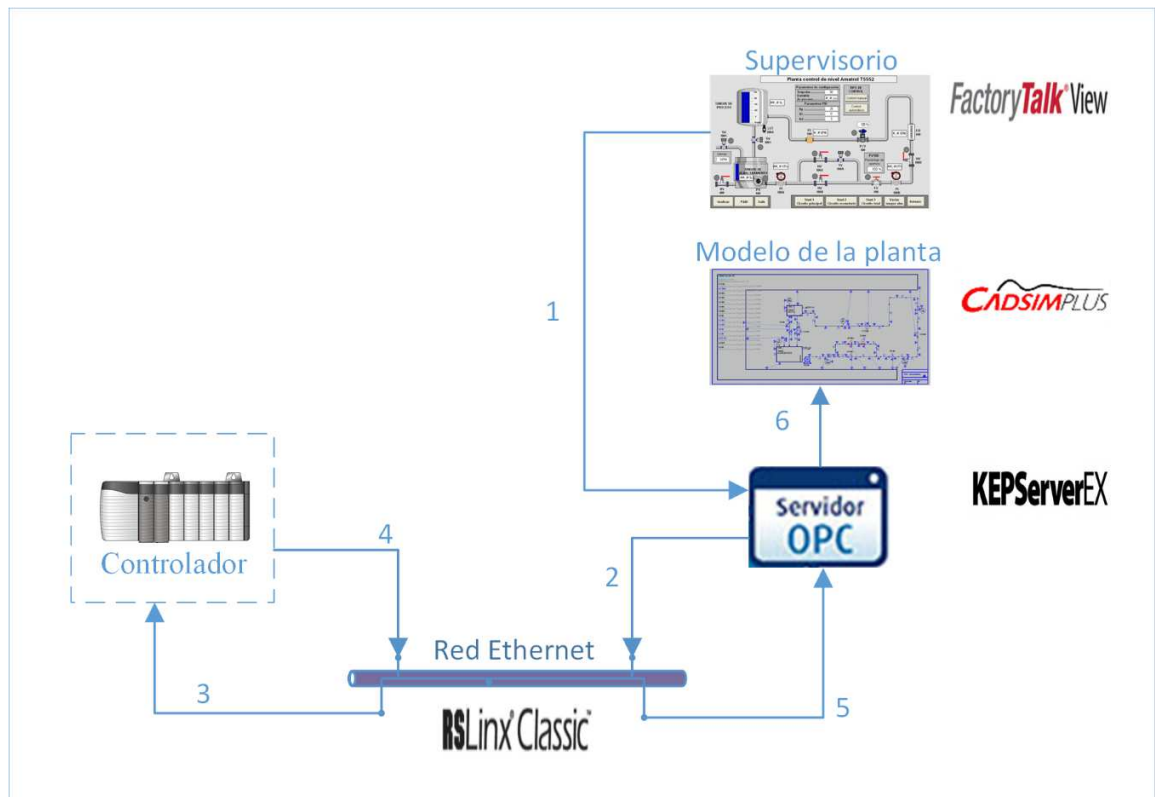


Fuente. Propia

3.1.3. Flujo de dato de la arquitectura

El flujo de datos cuando el entorno HILS está en funcionamiento comienza desde el supervisorio, las acciones realizadas en este son enviadas hacia el servidor OPC (FD1), este redirige el flujo de datos por medio de la red de comunicaciones Ethernet (FD2) hacia el controlador (FD3), este realiza las acciones requeridas modificando los datos y retornándolos de nuevo por la red Ethernet (FD4) hacia el servidor OPC (FD5) para ser redirigidas al modelo simulado de la planta (FD6), donde se refleja la acción y se repite el ciclo en forma inversa, este bucle continua así durante toda la marcha del laboratorio virtual soportado en el entorno HILS, ver **Figura 13**.

Figura 13. Flujo de datos en la arquitectura del Entorno HILS.



Fuente. Propia

3.2. Diseño de circuitos de planta y HMI del laboratorio virtual

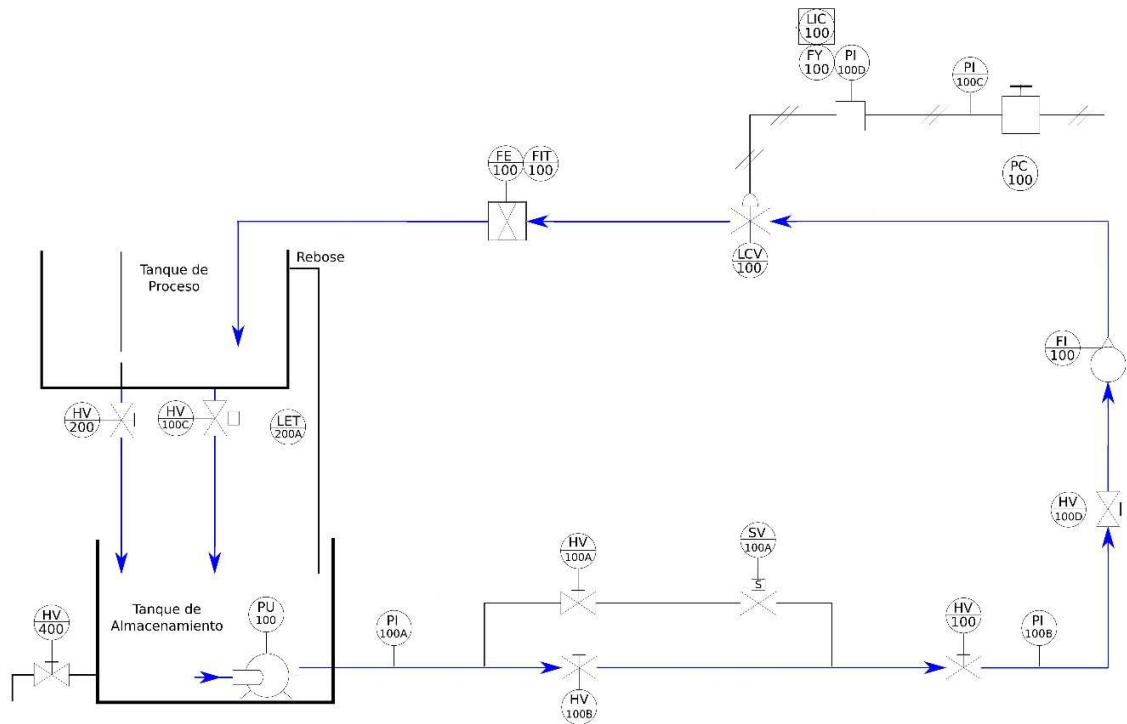
Esta sección está orientada a la definición de los circuitos de la planta e interfaces del laboratorio virtual soportado en el Entorno HILS, se plantearon diferentes características para el mismo.

3.2.1. Circuitos de recorrido

Se formuló el funcionamiento de la planta virtual a partir de tres circuitos de recorrido para el líquido de la planta Amatrol, para cada uno de ellos se hace la apertura de diferentes válvulas que permiten el flujo, a continuación, se detalla cada circuito.

- **Circuito principal:** el recorrido del fluido inicia en el tanque de almacenamiento, ingresa en el circuito hidráulico y posteriormente en la bifurcación de la tubería, el recorrido se realiza por la parte inferior dejando cerrada la parte superior, continúa por todo el circuito hasta llegar a el tanque de proceso y de este baja al tanque de almacenamiento repitiendo el proceso, ver **Figura 14**.

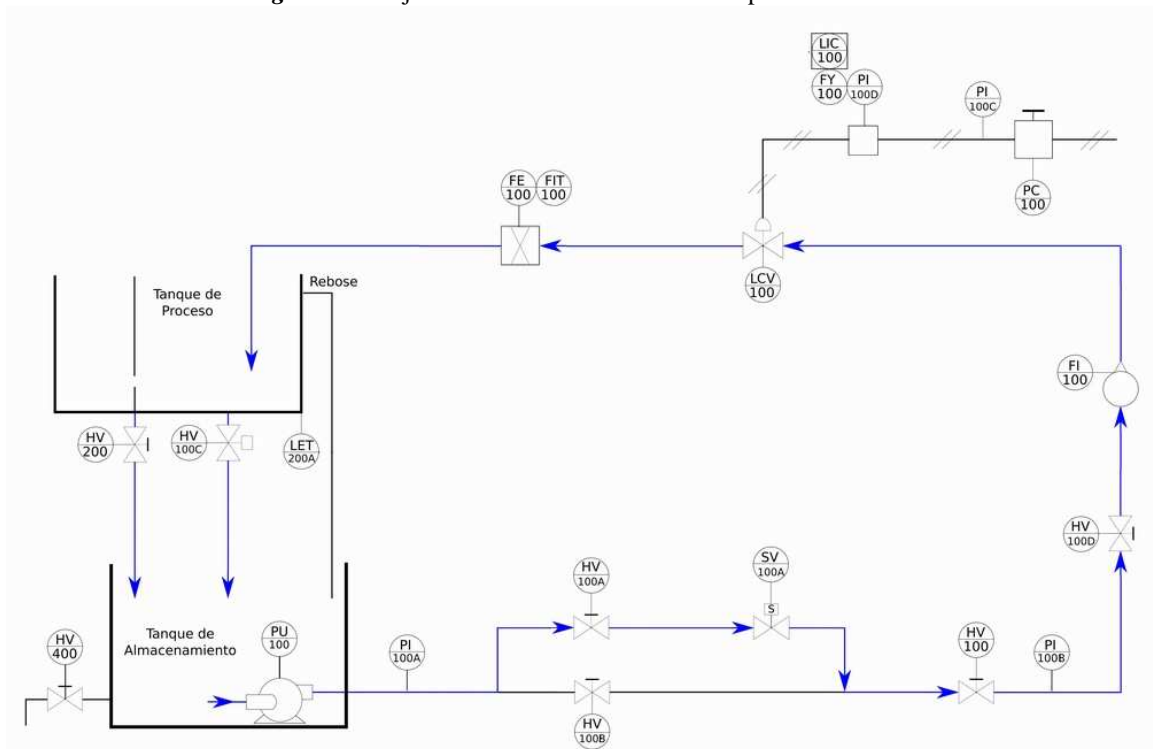
Figura 14. Flujo en el circuito principal de la planta Amatrol.



Fuente. Propia

- **Circuito secundario:** el recorrido del fluido inicia en el tanque de almacenamiento, ingresa en el circuito hidráulico y posteriormente en la bifurcación de la tubería, el recorrido se realiza por la parte superior dejando cerrada la parte inferior, continúa por todo el circuito hasta llegar a el tanque de proceso y de este baja al tanque de almacenamiento repitiendo el proceso, ver **Figura 15**.

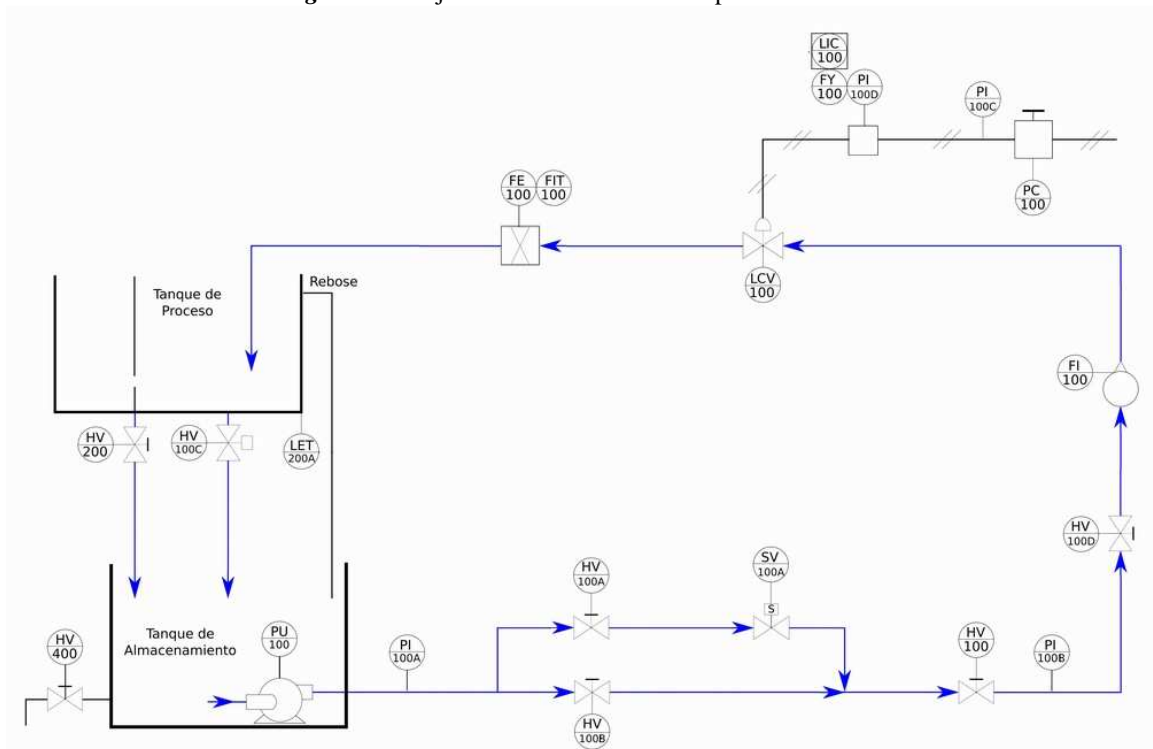
Figura 15. Flujo en el circuito secundario de la planta Amatrol.



Fuente. Propia

- **Circuito total:** el recorrido del fluido inicia en el tanque de almacenamiento, ingresa en el circuito hidráulico y posteriormente en la bifurcación de la tubería, el recorrido se realiza por ambas tuberías, continúa por todo el circuito hasta llegar al tanque de proceso y de este baja al tanque de almacenamiento repitiendo el proceso, ver **Figura 16**.

Figura 16. Flujo en el circuito total de la planta Amatrol.



Fuente. Propia

Identificados los circuitos que se van a implementar, a cada uno se le vincula el conjunto de válvulas que permiten habilitar el flujo a través de él. A cada grupo de válvulas se le asocia su respectiva etiqueta o tag que permite seleccionar el circuito a trabajar desde la función supervisión del laboratorio virtual, ver **Tabla 24**.

Tabla 24. Tags para la apertura de los circuitos de la planta virtual.

Circuito	Tag a crear	Válvulas a abrir
Principal	Circuito_1	HV100B – FV100 – HV100D – FCV100 – HV100C
Secundario	Circuito_2	HV100A - SV100A - FV100 – HV100D – FCV100 – HV100C
Total	Circuit_3	HV100A- HV100B – SV100A– FV100 – HV100D – FCV100 – HV100C

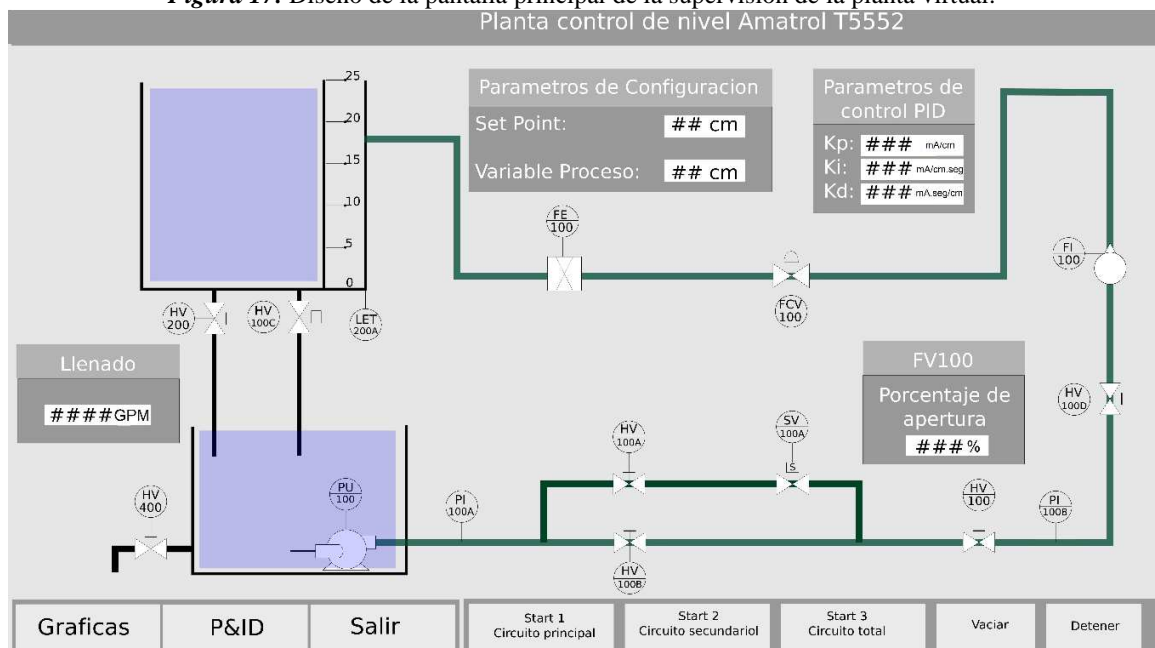
Fuente. Propia

3.2.2. HMI del Supervisorio

Se realizó un primer diseño de cómo se visualizaría la supervisión de la planta virtual, en este se plantean dos pantallas, una para el proceso y otra para el seguimiento gráfico de las variables.

- **Pantalla principal:** se planteó que fuese la representación gráfica más fiel posible al laboratorio Amatrol, con diferentes recuadros de parámetros que permitieran ingresar y visualizar valores como Setpoint, variable del proceso, parámetros del PID, flujo (GPM), porcentaje apertura de válvulas, ver **Figura 17**.

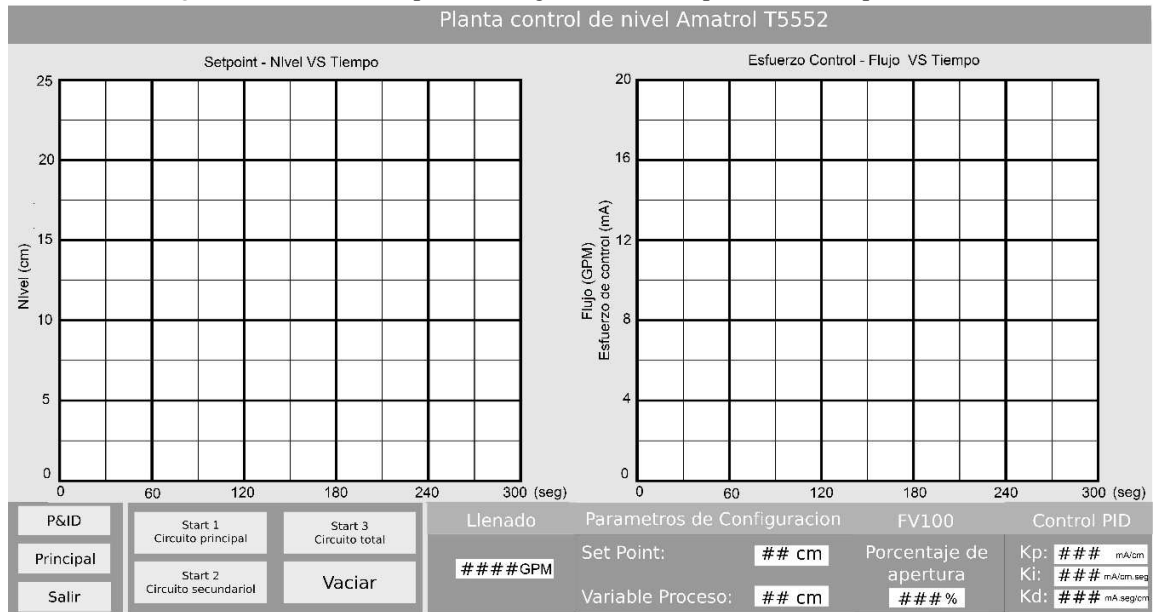
Figura 17. Diseño de la pantalla principal de la supervisión de la planta virtual.



Fuente. Propia

- **Pantalla de graficas:** se planteó una segunda pantalla la cual permitiera visualizar las variables más importantes del proceso (nivel, flujo) y que a su vez permitiera hacer configuraciones de control como: cambiar las constantes del PID, cambiar el Setpoint, variar el porcentaje de apertura de las válvulas y seleccionar el circuito a recorrer, ver **Figura 18**.

Figura 18. Diseño de la pantalla de gráficos de la supervisión de la planta virtual.



Fuente. Propia

A partir de cada botón de desplazamiento entre pantallas se hizo una asociación previa de tags, ver **Tabla 25**.

Tabla 25. Tags a crear para el desplazamiento entre pantallas.

Tag a crear	Función
Principal	Permite dirigirse desde la pantalla de gráficos hacia la pantalla principal
Gráficos	Permite dirigirse desde la pantalla de principal hacia la pantalla de gráficos
Salir	Permite salir de la supervisión

Fuente. Propia

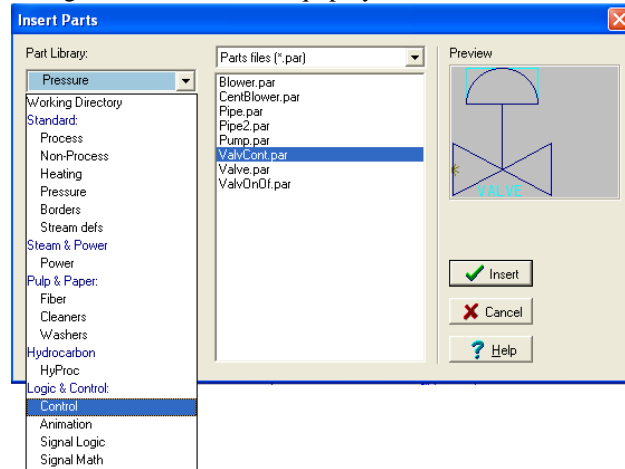
3.3. Procedimiento para la implementación del entorno HILS

El procedimiento, estuvo dividido en seis (6) pasos que permitieron el diseño de la planta virtual, la interconexión entre los componentes hardware y herramientas software, el control del proceso y la supervisión. En los siguientes apartados se resume el procedimiento, para mayor información ver **Anexo E**.

3.3.1. Planta virtual

El primer paso fue el diseño del modelo de la planta, que se hizo en el software CADSIM Plus, el cual permitio realizar el modelo seleccionando los módulos de equipo y de control que conforman la planta, a partir de una librería de partes disponibles (actuadores, sensores, tubería, etc.), ver **Figura 19**.

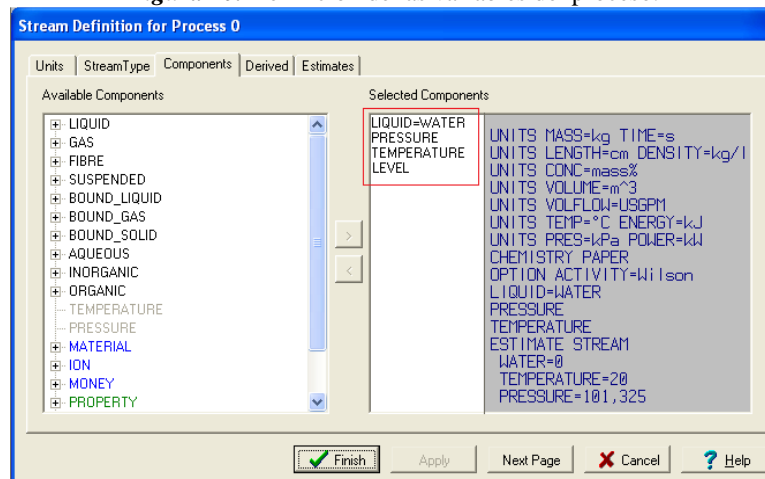
Figura 19. Ingreso de módulos de equipo y de control al modelo de la planta.



Fuente. Propia

El proceso sigue con la definición de las variables del proceso (nivel, flujo y presión), ver **Figura 20.**

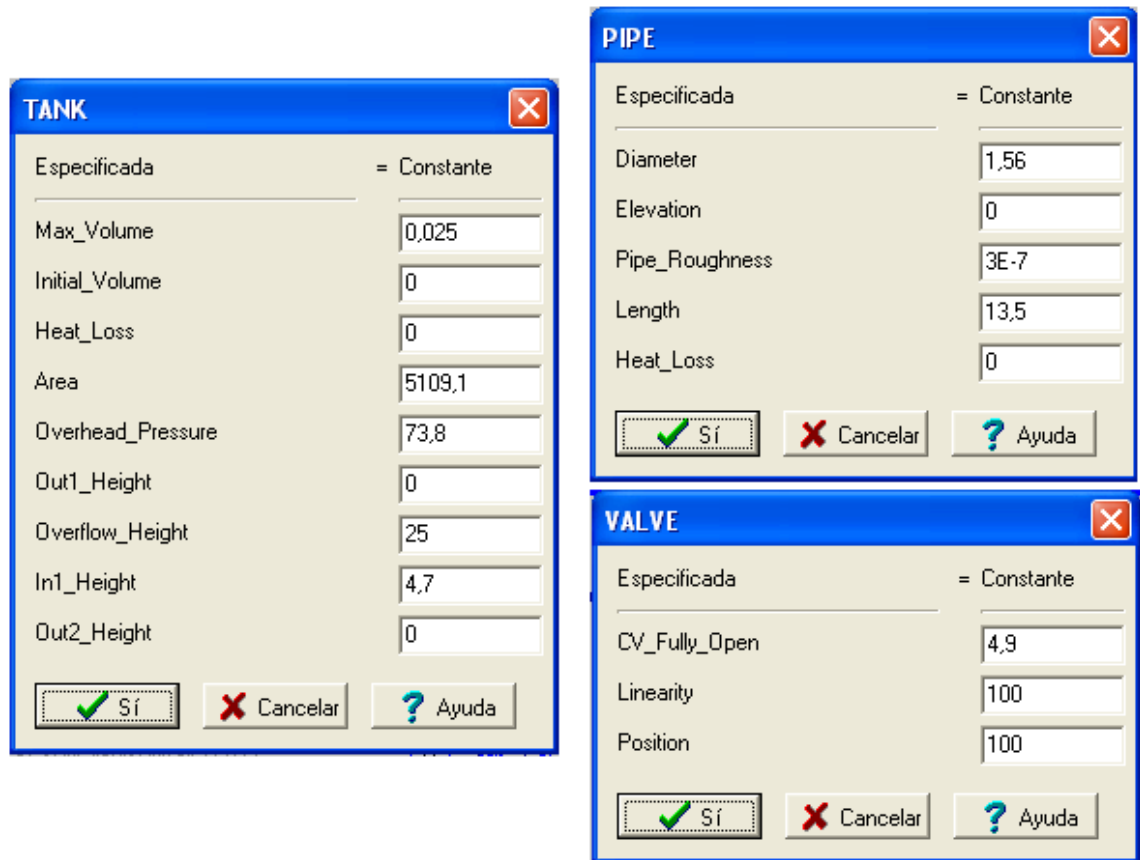
Figura 20. Definición de las variables del proceso.



Fuente. Propia

Se continuo con el ingreso de parámetros tanto de equipos como de instrumentos, este es el paso más importante debido a que permite que el modelo de la planta virtual sea lo más similar a la planta real, para ello se extrajeron los valores de los parámetros directamente de la planta física y su documentación, ver **Figura 21**

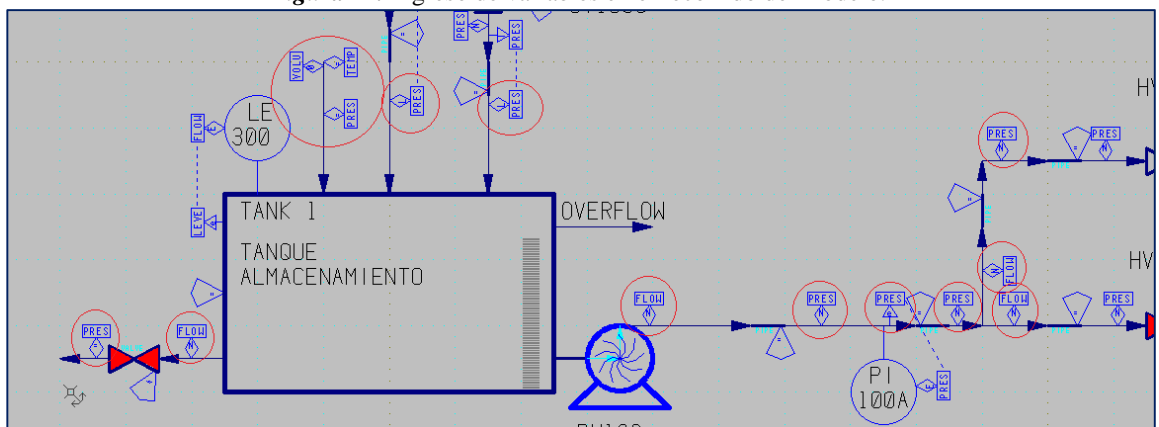
Figura 21. Ingreso de parámetros para los equipos e instrumentos del modelo.



Fuente. Propia

Se finaliza con la especificación del recorrido de las variables en el lazo del proceso, ver Figura 22.

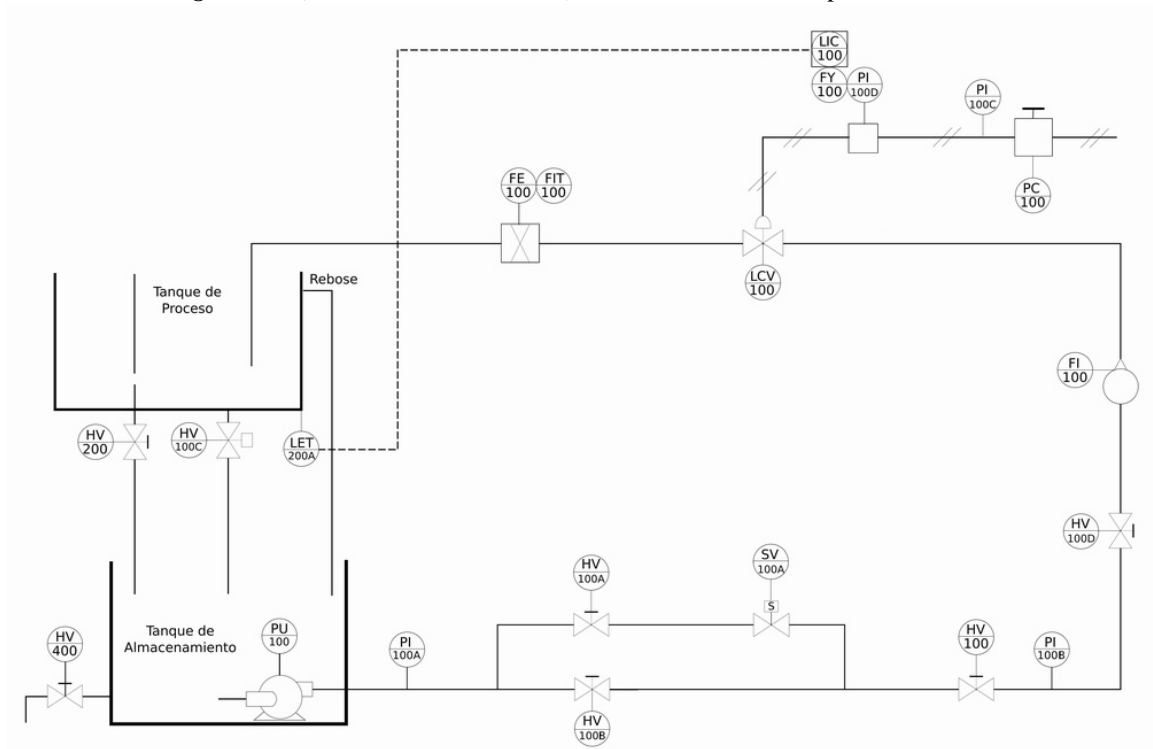
Figura 22. Ingreso de variables en el recorrido del modelo.



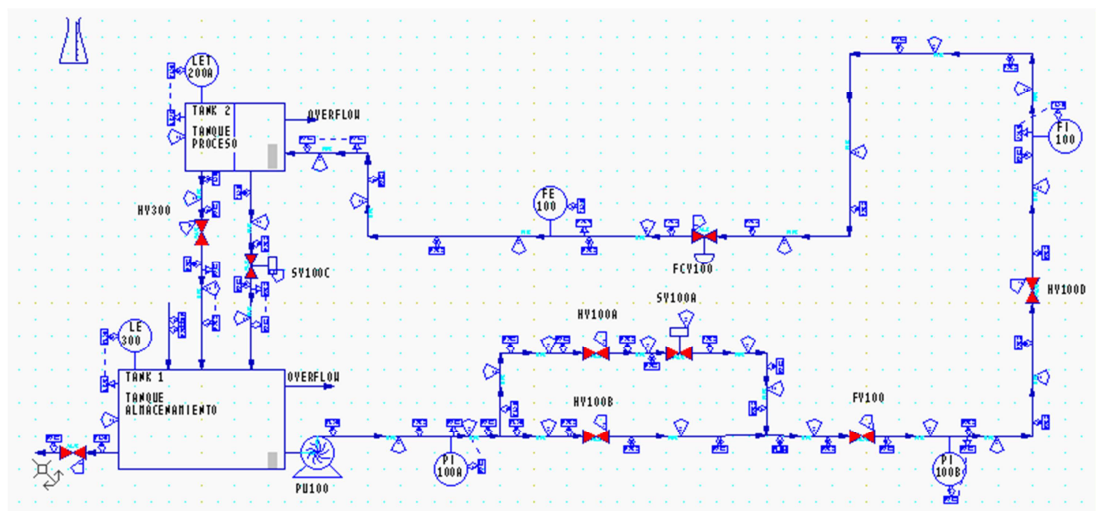
Fuente. Propia

Con esto se da por creado el modelo de la planta, los insumos para realizar el modelo fueron el P&ID de la planta Amatrol T5552, los modelos de la norma ISA S88, ver **Anexo D** y la documentación de los fabricantes de los instrumentos, ver **Figura 23**.

Figura 23. a) P&ID Planta Amatrol b) Modelo CADSIM Plus planta Amatrol.



a)



b)

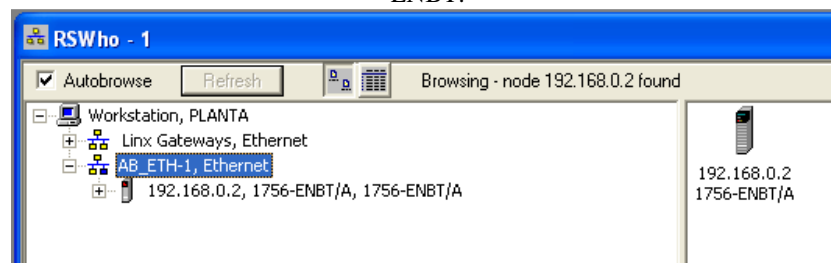
Fuente. Propia

3.3.2. Comunicación Ethernet

En este nivel el paso inicial consistió en la conexión física del PLC y el computador a la red institucional a través de un cable de red.

El segundo paso fue utilizar la aplicación RSLinx Classic en el componente computador para crear el driver o manejador de la comunicación Ethernet, se vinculó el PLC a la red a través de su módulo Ethernet 1756-ENBT, esto se hizo vinculando la dirección IP del módulo al driver y se finalizó verificando la correcta conexión del módulo en la red, ver **Figura 24**. Mayores detalles ver **Anexo E**.

Figura 24. Driver para la comunicación Ethernet entre los componentes PC y PLC, a través del módulo 1756-ENBT.



Fuente. Propia

3.3.3. Edición de lógica de control

Para programar el componente PLC se usó la aplicación RSLogix 5000, en donde se implementó la lógica de control a partir de lenguaje de escalera. Esto se inició con la creación de un nuevo proyecto en RSLogix 5000, en el cual se generaron veinticinco (25) tags asociadas a la instrumentación y botones del supervisor, el insumo para desarrollar esto fue el P&ID y el diseño de la **sección 3.2**, ver **Figura 25**. Mayores detalles ver **Anexo E**.

Figura 25. Tags usadas en el código de control del laboratorio virtual.

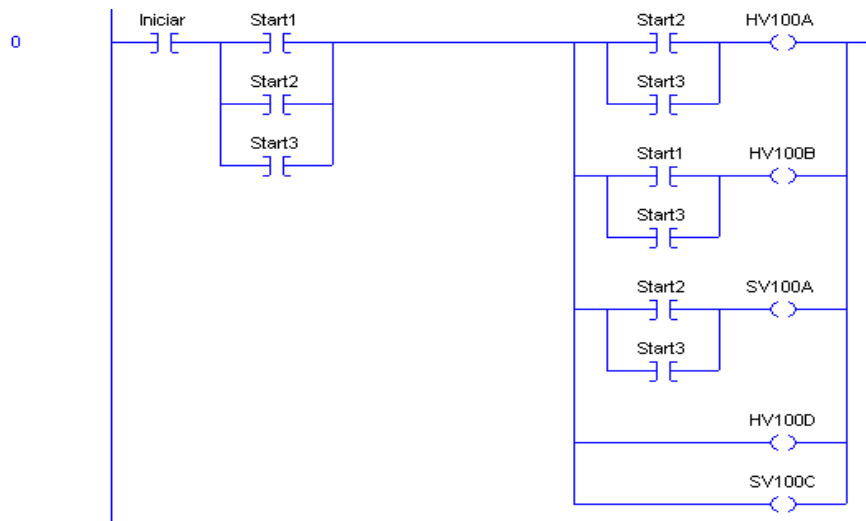
Name	Value	Style	Data Type
Control_Manual	0	Decimal	BOOL
Control_PID	0	Decimal	BOOL
FCV100	0.0	Float	REAL
FE100	0.0	Float	REAL
FI100	0.0	Float	REAL
FV100	0.0	Float	REAL
FV100Copy	0.0	Float	REAL
HV100A	0	Decimal	BOOL
HV100B	0	Decimal	BOOL
HV100D	0	Decimal	BOOL
HV300	0	Decimal	BOOL
HV400	0	Decimal	BOOL
Iniciar	0	Decimal	BOOL
LET200A	0.0	Float	REAL
LEVEL	0.0	Float	REAL
LLENAR2	0.0	Float	REAL
+ PID	(...)		PID
PI100A	0.0	Float	REAL
PI100B	0.0	Float	REAL
PUMP	0	Decimal	BOOL
Start1	0	Decimal	BOOL
Start2	0	Decimal	BOOL
Start3	0	Decimal	BOOL
SV100A	0	Decimal	BOOL
SV100C	0	Decimal	BOOL

Fuente. Propia

Se prosiguió con el diseño del código, en el cual se destacaron dos secciones.

En la primera sección se configuraron tres recorridos por el circuito hidráulico (principal, secundario y total), y se diseñaron tres tags asociadas a cada recorrido, que al ser activadas habilitan el paso por las diferentes válvulas, ver **Figura 26**.

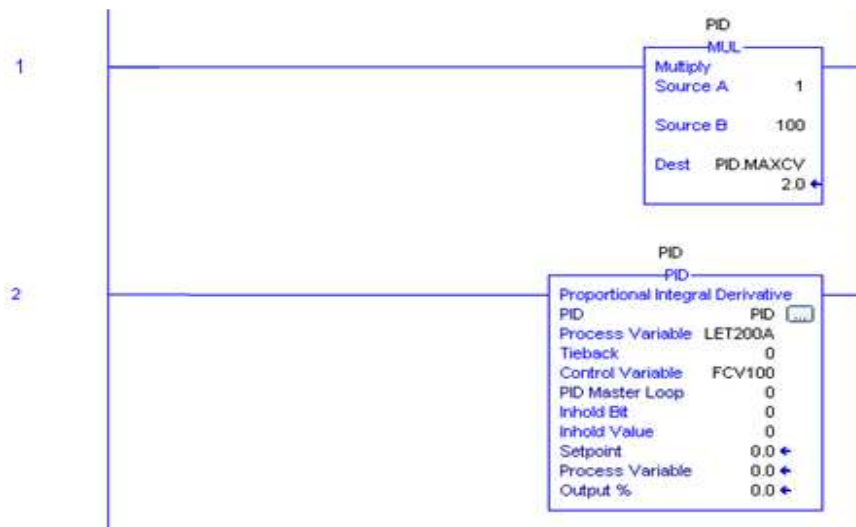
Figura 26. Sección del ladder encargada de la configuración del recorrido del líquido por cada circuito.



Fuente. Propia

En la segunda sección, se configuró la acción de control para la variable de proceso (nivel) del tanque de proceso de la planta virtual implementando un controlador PID, en este se ingresaron las configuraciones del PID, como: la variable controlada y la manipulada, las constantes K_p , K_i , K_d , ver **Figura 27**.

Figura 27. Sección del ladder encargada de la configuración del controlador PID.

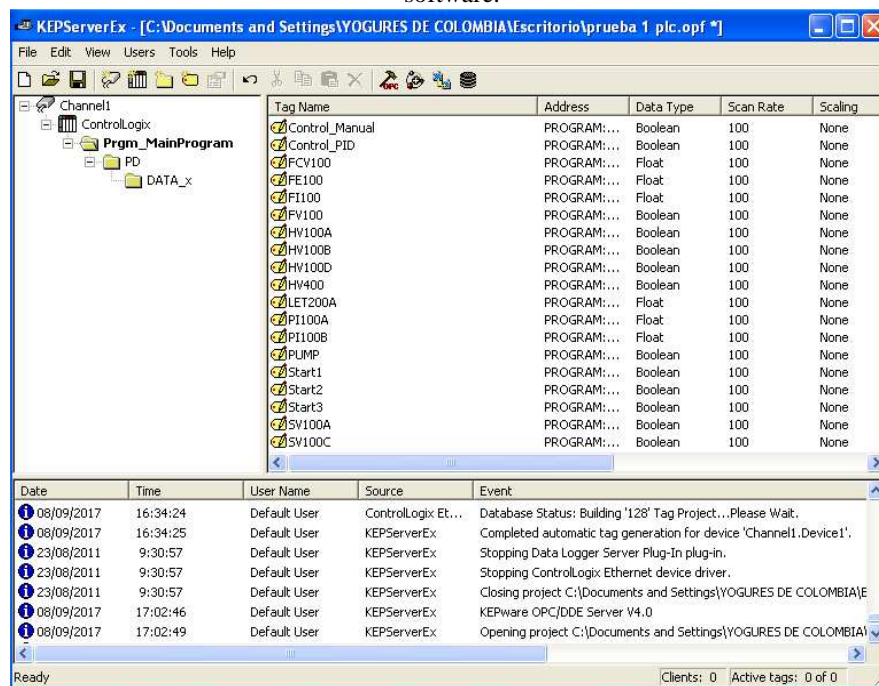


Fuente. Propia

3.3.4. Servidor OPC

La conexión entre el componente PLC y KEPServerEX, se formó a partir de la red Ethernet previamente configurada en RSLinx Classic, el primer paso fue la creación de un proyecto en KEPServerEX en el cual se hizo la selección del driver del componente a conectar (PLC); después se eligió el dispositivo que vincula a la red Ethernet y a KEPServerEX o sea el componente PC, como paso siguiente se escogió el dispositivo a través del cual el componente PLC se conectara con KEPServerEX, en este caso el modulo Ethernet, vinculándolo mediante: su dirección IP, ubicación del backplane y slot del controlador, el resto de configuraciones se dejaron por defecto; con estos pasos se creó el proyecto asociado al componente PLC; el paso final fue exportar al servidor OPC las tags del código de control, dejándolas listas para su interacción con las otras herramienta software, ver **Figura 28**. Mayores detalles ver **Anexo E**.

Figura 28. Servidor OPC creado para permitir el flujo de datos entre el componente PLC y las herramientas software.



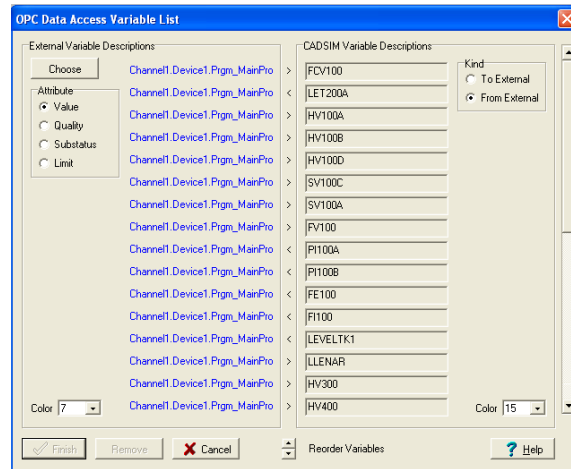
Fuente. Propia

3.3.5. Conexión entre el Servidor OPC y el modelo de la planta virtual

En este nivel se vincularon las tags del PLC con las del modelo de la planta virtual, a través del servidor OPC (KEPServerEX) y CADSIM Plus.

El primer paso formar en CADSIM Plus un acceso a datos OPC, dibujando una figura de polígono dentro de la herramienta, dentro de este, se vincularon las tags extraídas de KEPServerEX con las de los equipos e instrumentos de la planta virtual, ver **Figura 29**. Para más detalles ver **Anexo E**.

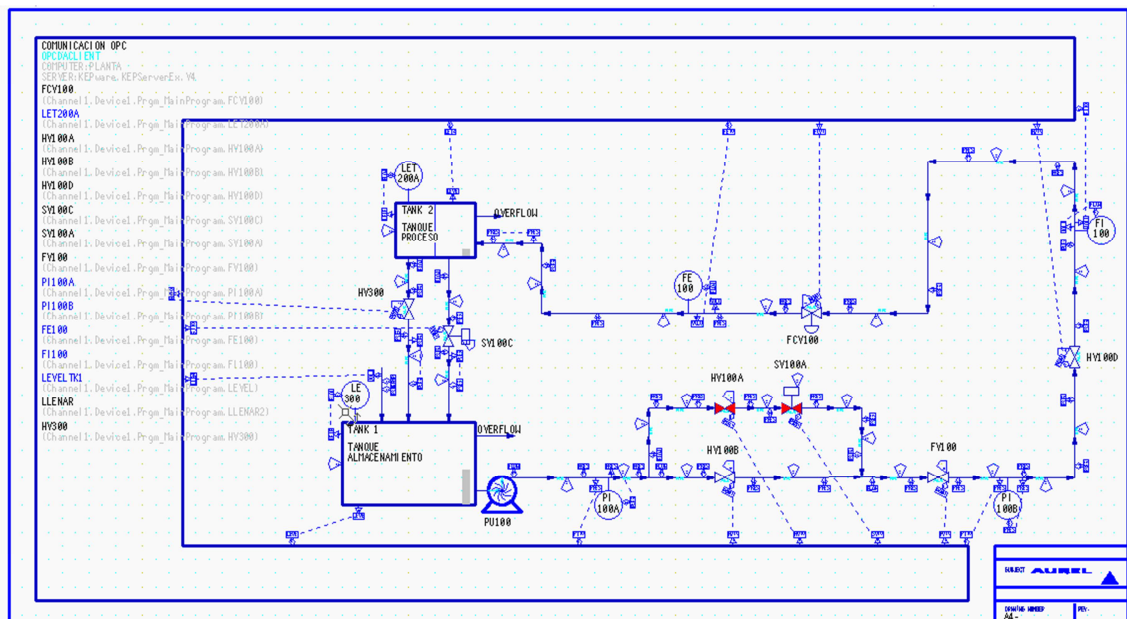
Figura 29. Vinculación de las tags entre KEPServerEX y CADSIM Plus.



Fuente: propia

Después se conectaron gráficamente las tags del modelo con el polígono del acceso OPC, para ello se eliminaron los tags de CADSIM Plus de las variables a utilizar y seguidamente se reinsertaron agregándolos al polígono, ver **Figura 30**.

Figura 30. Vinculación gráfica de las variables del modelo de la planta virtual con el acceso a Datos OPC.



Fuente: Propia

3.3.6. Supervisorio

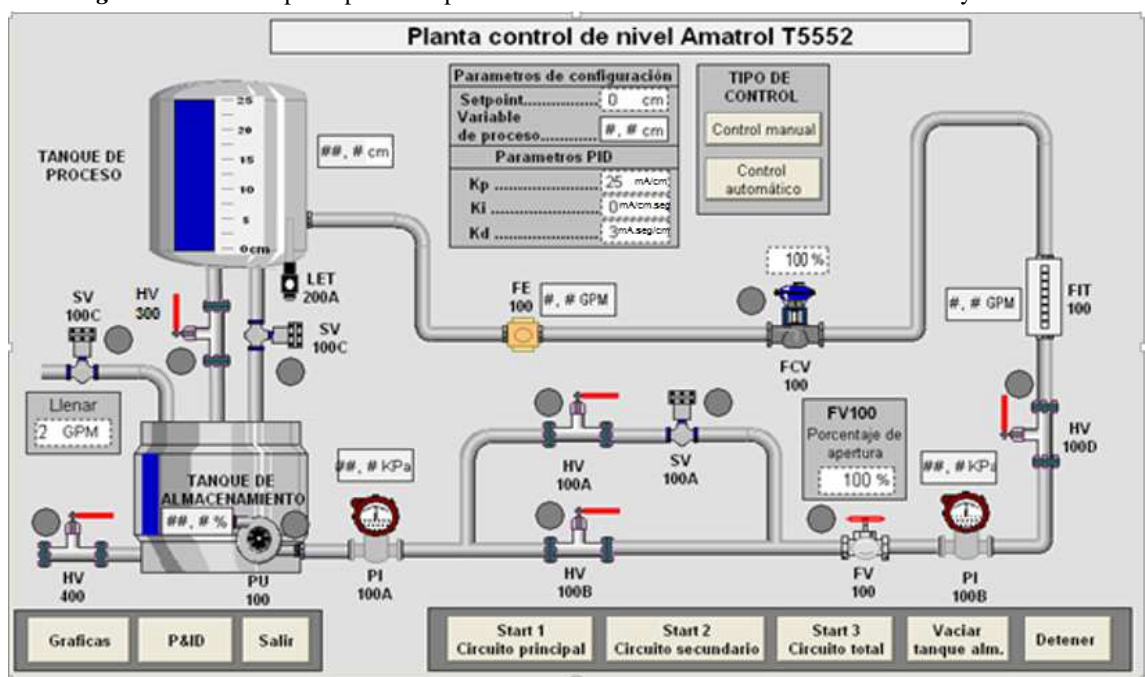
La supervisión de la planta virtual fue realizado en FactoryTalk View, que fue la herramienta seleccionada para crear el supervisorio, el primer paso fue configurar la

conexión para la transferencia de datos entre FactoryTalk View y el componente PLC mediante el servidor OPC, dentro de la herramienta software se crearon tres pantallas para la interfaz gráfica con base en el diseño de la **sección 3.2**, luego se vincularon las tags del componente PLC con los elementos gráficos del supervisorio y se finalizó con la creación del ejecutable de la aplicación, para un mayor detalle ver **Anexo E**.

A continuación, se detallan las pantallas creadas:

La pantalla número uno es la **principal**, ver **Figura 31**, en esta se encuentra la representación gráfica o mímico del proceso, elaborada de la manera más fiel posible, al proceso real, incorporando elementos como tanques, indicadores, válvulas, sensores y actuadores que conforman el lazo de control de nivel, además, se presentan luces indicadoras que muestran el estado actual de cada instrumento, entradas numéricas que modifican los valores de los instrumentos, y displays numéricos que permiten la visualización de los valores de las variables. También cuenta con seis recuadros, el primero está ubicado en la parte central, e ingresa los parámetros de configuración para el control; el segundo, está en la parte superior derecha, y permite seleccionar el tipo de control (manual o automatico); el tercero, está ubicado en la parte central izquierda permite el flujo de líquido para el llenado del tanque de almacenamiento; el cuarto está ubicado en la parte central inferior, permite modificar el porcentaje de apertura de la válvula FV100; el quinto, está en la parte inferior izquierda, en el que se encuentran los botones de navegación entre pantallas y de salida; y el sexto, presenta los circuitos hidráulicos, permite elegir el circuito por donde fluirá el líquido, también vaciar el tanque de almacenamiento y detener el proceso.

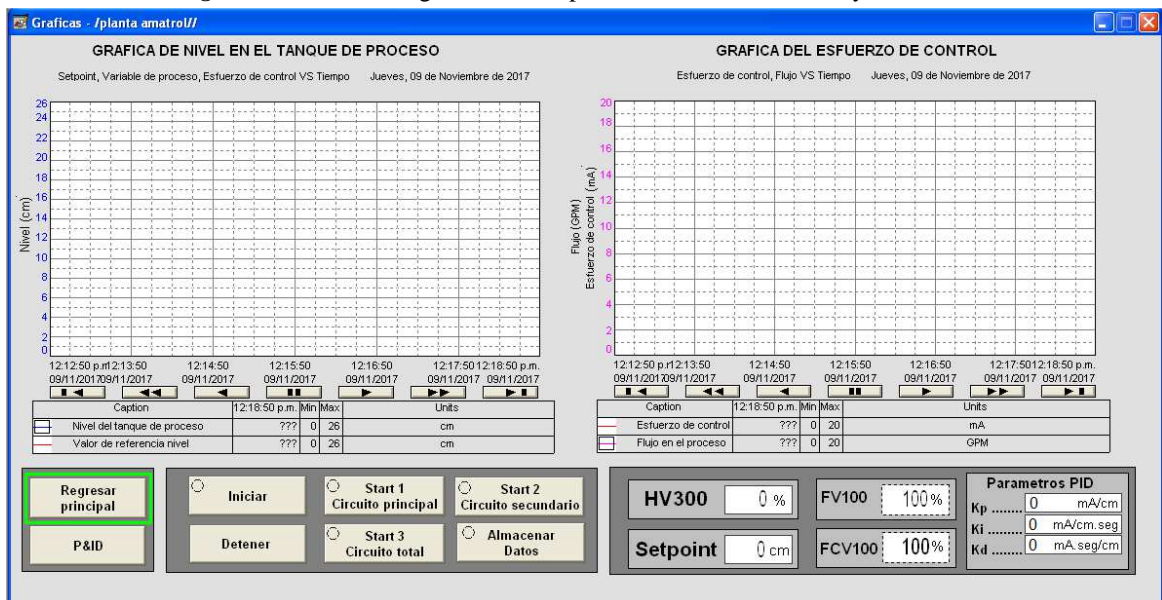
Figura 31. Pantalla principal del supervisorio del laboratorio virtual creada en FactoryTalk View.



Fuente. Propia

La número dos es la pantalla de **gráficas**, ver **Figura 32**, dividida en dos graficas de tendencias, la de la parte izquierda permite la observación del Setpoint y el nivel en el tanque de proceso a lo largo del tiempo; y la de la derecha, muestra el esfuerzo de control de la válvula de control y el flujo de líquido a su salida. En la parte inferior hay dos recuadros de botones, en el de la izquierda se encuentran los botones de navegación entre pantallas y en el de la derecha las modificaciones de control, dentro de este se hallan los botones que permitían seleccionar los circuitos por donde fluirá el líquido, el botón de detener el proceso, además presenta entradas numéricas que permiten cambiar las constantes del controlador, el Setpoint del proceso y el porcentaje de las válvulas FV100 y FV100.

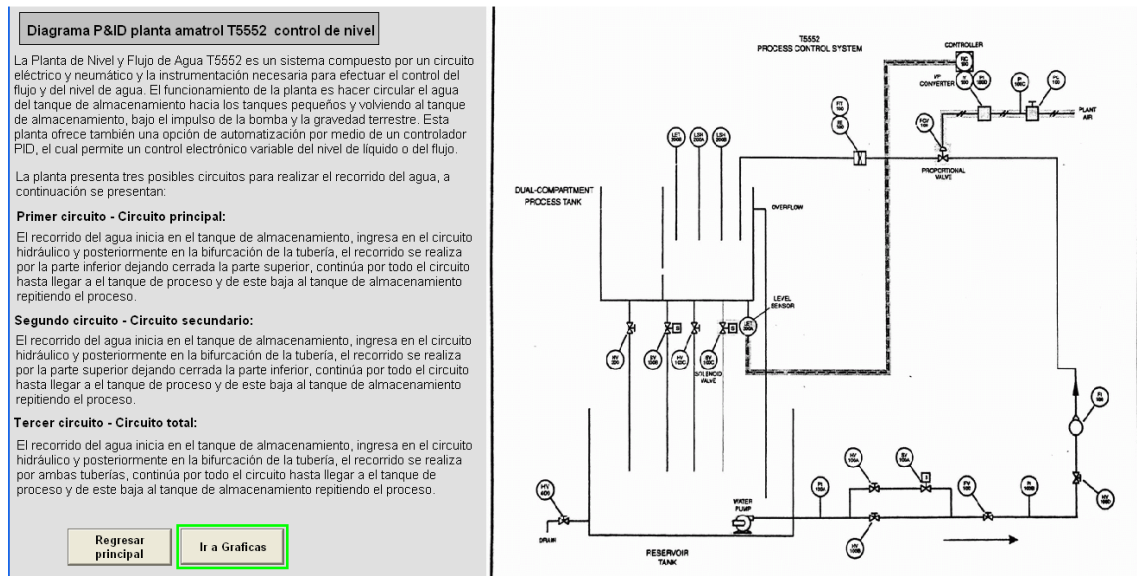
Figura 32. Pantalla de gráficas del supervisorio creada en FactoryTalk View.



Fuente. Propia

La pantalla número tres se denomina **P&ID**, ver **Figura 33**, en la cual se detalla la descripción de la planta, los circuitos de recorrido del fluido y el diagrama P&ID. En la parte inferior hay dos botones de navegación para ir a las otras pantallas.

Figura 33. Pantalla P&ID del supervisor creada en FactoryTalk View.



Fuente. Propia

3.4. Pruebas de funcionamiento del Entorno

Una vez implementado el entorno se realizaron 3 tipos de pruebas para determinar su funcionamiento en tiempo real, y su grado de similitud al proceso real a partir de los requerimientos Hardware del entorno, tiempo de muestreo y similitud de la planta.

3.4.1. Toma de tiempos

Se propuso una prueba respecto al tiempo de llenado y vaciado de los tanques de las dos plantas por medio de una serie de seis casos, que permitiera compara el funcionamiento del modelo simulado con la planta Amatrol, ver **Tabla 26**, para más detalles ver **Anexo E**.

Tabla 26. Comparación de resultados prueba de tiempo planta virtual vs Amatrol.

Casos	Planta	Tiempo (min:s)	Tiempo en porcentaje Lab. Virtual/Amatrol (%)	Error (%)
1. Llenado del tanque de proceso de 0-10in por el circuito principal, con la válvula SV100C cerrada, y la válvula FCV100 totalmente abierta, con un flujo de 2GPM	Virtual	03:40	104.26/100	4.26
	Amatrol	03:31		
2. Llenado del tanque de proceso de 0-10in por el circuito principal, con la válvula SV100C abierta, y la válvula FCV100 totalmente abierta, con un flujo de 2GPM	Virtual	05:21	101.9/100	1.90
	Amatrol	05:15		
3. Llenado del tanque de proceso de 0-10in por	Virtual	03:11	88.42/100	-11.58

el circuito secundario, con la válvula SV100C cerrada, y la válvula FCV100 totalmente abierta, con un flujo de 2GPM.	Amatrol	03:36		
4. Llenado del tanque de proceso de 0-10in por el circuito secundario, con la válvula SV100C abierta, y la válvula FCV100 totalmente abierta, con un flujo de 2GPM	Virtual	04:49	89.47/100	-10.53
	Amatrol	05:23		
5. Llenado del tanque de proceso de 0-10in por el circuito total, con la válvula SV100C cerrada, y la válvula FCV100 totalmente abierta, con un flujo de 2GPM.	Virtual	03:40	103.28/100	3.28
	Amatrol	03:33		
6. Llenado del tanque de proceso de 0-10in por el circuito total, con la válvula SV100C abierta, y la válvula FCV100 totalmente abierta, con un flujo de 2GPM.	Virtual	05,53	104,14/100	4,14
	Amatrol	05,31		

Fuente. Propia.

Entre los seis casos, las diferencias tuvieron variaciones entre -11,58% y 4,26%, siendo los casos 3 y 4 los que más presentaron con -11,58% y -10,53% respectivamente. Mientras que el caso con menor diferencia fue el 2 con 1,9%, seguido de los casos 5, 6 y 1 con 3.28%, 4.14% y 4.26%.

Dado que los casos con el error más alto fueron el 3 y 4, en donde se miden el llenado del tanque de proceso por medio del circuito secundario de la planta, se decidió no tener en cuenta este circuito para las pruebas de evaluación; respecto al circuito total, sus resultados fueron buenos, para el caso 5 se obtuvo un error de 3,28% y en el caso 6 de 4,14%, pero en conjunto sus diferencias no fueron más bajas que las del circuito principal que tuvo en el caso 1 un error de 4.26% y en el caso 2 de 1.9%.

Gracias a los resultados de la prueba de tiempos, se concluyó que la planta simulada y la real tienen buen grado de similitud, principalmente para el circuito principal y total donde su margen de error es menor al $\pm 5\%$, siendo este un margen aceptable para el estudio, se decidió realizar las pruebas con el circuito principal, dado que fue el que obtuvo el conjunto de errores más bajo.

3.4.2. Prueba de tiempos de muestreo y análisis de respuesta temporal

Esta prueba consistió en la realización de un análisis de la respuesta temporal del proceso con respecto al cambio en el tiempo de muestreo en la simulación y la repercusión de las características hardware y de S.O del componente computador en el cual se implementa la planta virtual, con la finalidad de definir el rango de tiempo de muestreo apropiado para la simulación y los requisitos mínimos requeridos para implementar el entorno HILS.

En primera instancia se definieron los requisitos mínimos requeridos para implementar el entorno HILS a partir de las recomendaciones de los fabricantes de cada herramienta; a

continuación se listan los requerimientos que cada programa necesita para su correcto funcionamiento:

FactoryTalk View Site Edition v8.1

- Intel Pentium 4, 2GHz, 1GB de RAM.
- Windows XP SP3 32Bit, Windows 7 Pro 32 y 64bit, Windows 8 y 8.1 32 y 64 bit.
- Windows Server 2008 y 2012.

KEPServerEX v5

- 2.0 GHz procesador.
- Mínimo memoria RAM de 1 GB.
- Espacio de disco disponible de 180 MB.
- Tarjeta Ethernet.
- Super VGA (800x600) o mayor resolución de video.
- Windows XP, Win Vista, Win 7, Win 8 y Win 10 de 32 y 64 bits.
- Windows server 2003 R2 (32bit), 2008, 2008 R2, 2012, 2012 R2

CADSIM Plus v2.5

- Mínimo memoria RAM de 1 GB y recomendable memoria RAM de 2 GB.
- Espacio de disco disponible de 165 MB.
- Windows Vista, Win 7, Win 8 y Win 10 de 32 y 64 bits.
- Monitor de resolución 1024x768.

RSLinx Classic V2.57

- Intel Pentium 2, procesador de 100MHz, 32 MB de RAM.
- Al menos 35 MB de espacio disponible en el disco duro.
- Una pantalla SVGA de 16 colores con una resolución de 800 por 600 o superior.
- Tarjeta Ethernet.
- Windows XP, win Vista, Win 7 y Windows Server 2003 y 2008.

RSLogix 5000 v19.1

- Pentium 3, procesador de 833MHz, 512MB de memoria RAM.
- Al menos 3 GB de espacio disponible en el disco duro.
- Pantalla con una resolución de 1024x768 pixeles True Color o superior.
- Windows XP, Win Vista, Win 7 de 32 y 64 bits.
- Windows Server 2003 R2, 2008.

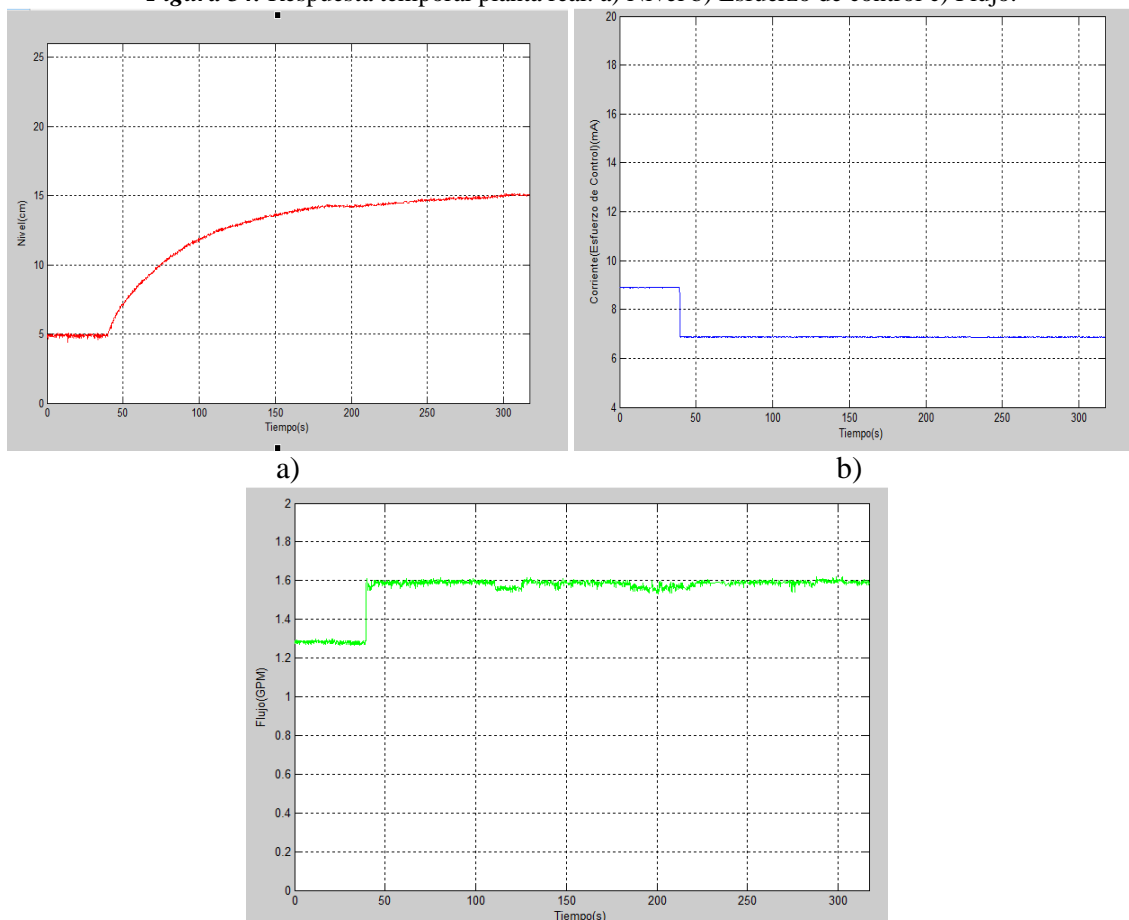
Según los requerimientos dados las características mínimas para desarrollar el entorno HILS son:

- Intel Pentium 4, procesador de 2 Ghz y 2 GB de memoria RAM.
- Espacio de disco disponible de 3,5 GB.
- Windows XP, Win 7.
- Una tarjeta Ethernet.
- Monitor de resolución 1024x768 pixeles.

En segunda instancia se realizó una prueba en dos computadores con diferentes características hardware, esta prueba consistió en analizar la dinámica del sistema de primer orden de la planta mediante su respuesta temporal a la aplicación de una entrada tipo escalón, este análisis se llevó a cabo con diferentes tiempos de muestreo configurados en la herramienta CADSIM Plus a través del parámetro *Incremento de tiempo*.

Para tener un marco de referencia se realizó la práctica del curso de laboratorio de control de procesos de identificación para la planta Amatrol y de esta forma se obtuvo la curva de reacción de la planta real, ver **Figura 34**.

Figura 34. Respuesta temporal planta real. a) Nivel b) Esfuerzo de control c) Flujo.



c)
Fuente. Propia.

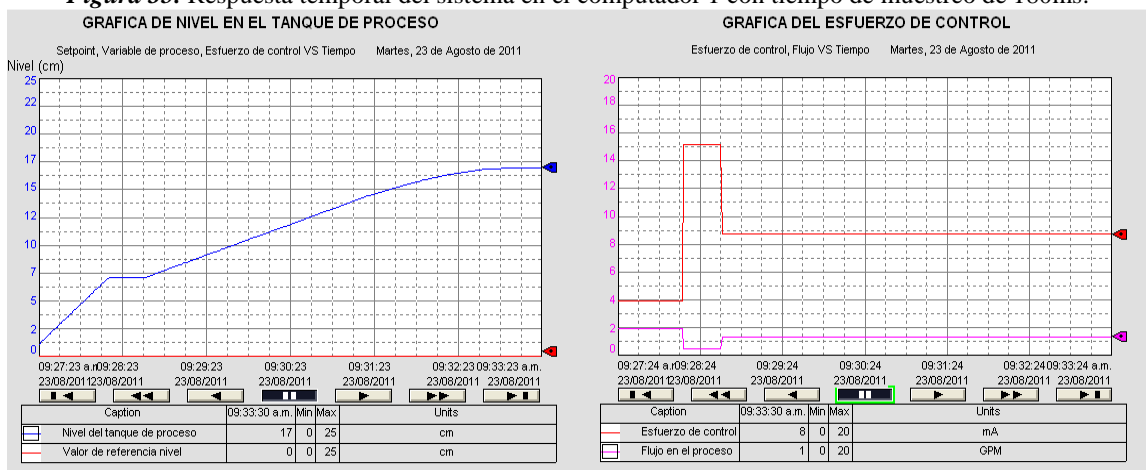
Para obtener la curva de reacción de la planta virtual se desarrolló la práctica de identificación de la planta virtual Amatrol, para ver la guía de esta práctica ir al **Anexo I**. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas en los dos computadores.

Computador 1

Se realizó esta prueba en un computador con sistema operativo Windows 10 (64 bits), Intel Core i5, procesador de 1.7 Ghz y 4 GB de memoria RAM; en este se trabajó la máquina virtual “Windows XP Professional – CadSim PLus” que contiene todos los programas que permiten la realización del entorno HILS, esta máquina virtual se ejecuta en Windows XP Professional (Service Pack 3) con Intel Core i5 de 1Gb de memoria RAM, 1 procesador con 1 núcleo y espacio de almacenamiento de 80Gb. Estas serían las condiciones mínimas que se van a trabajar como ejemplo, en este caso la maquina funciona bien, corre todas las aplicaciones sin problemas, los tiempos de espera para abrir las aplicaciones tienen un retraso mínimo. A continuación se presentan los resultados de la prueba de respuesta temporal ante cambios del periodo de muestreo:

Se obtuvo el tiempo de muestreo mínimo con el que la planta virtual puede trabajar, el cual es de 180ms, con este valor se presentan los mejores resultados de similitud respecto al proceso real, ver **Figura 35**.

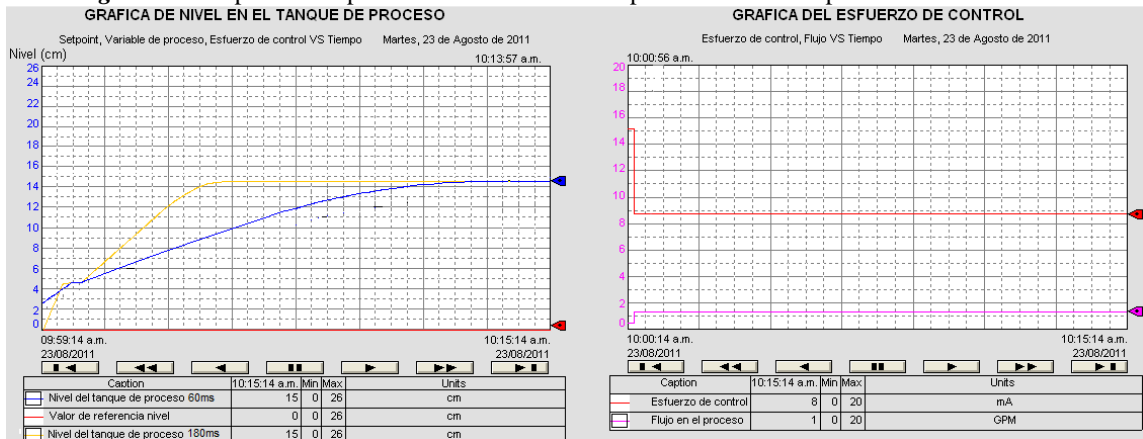
Figura 35. Respuesta temporal del sistema en el computador 1 con tiempo de muestreo de 180ms.



Fuente. Propia.

Con tiempos de muestreo menores a 180ms el proceso pierde su dinámica y su comportamiento es diferente al del proceso real, por ejemplo, para un tiempo de 60ms la planta virtual se ralentiza (línea azul), ver **Figura 36**.

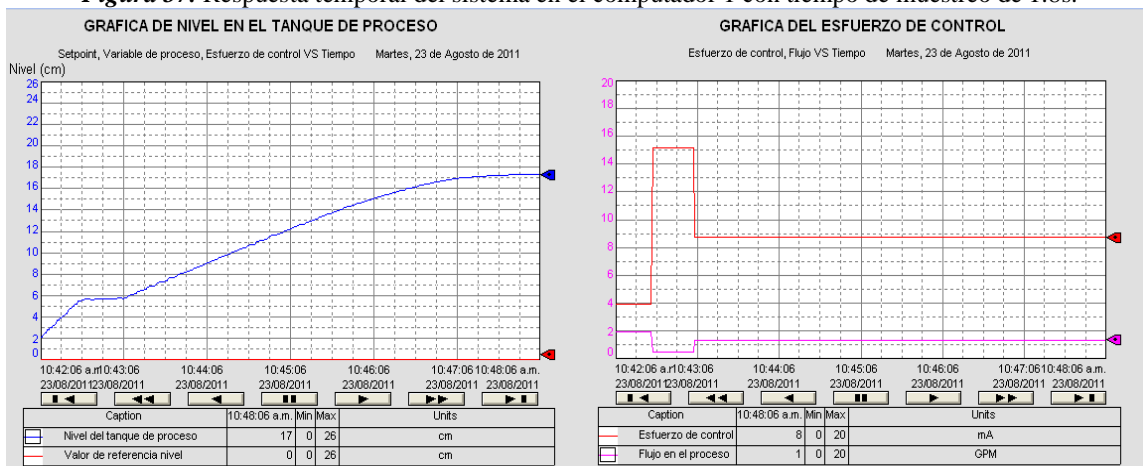
Figura 36. Respuesta temporal del sistema en el computador 1 con tiempo de muestreo de 60ms.



Fuente. Propia.

El tiempo de muestreo máximo posible con el que la planta virtual puede trabajar es de 1.8s, con este valor se presentan resultados aceptables, aunque en la respuesta del sistema se comienzan a observar datos escalonados, ver **Figura 37**.

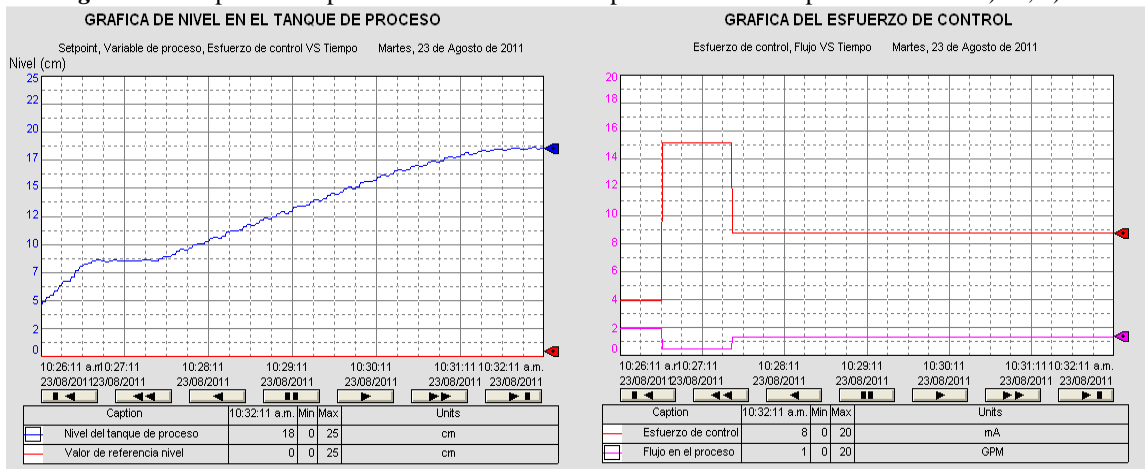
Figura 37. Respuesta temporal del sistema en el computador 1 con tiempo de muestreo de 1.8s.



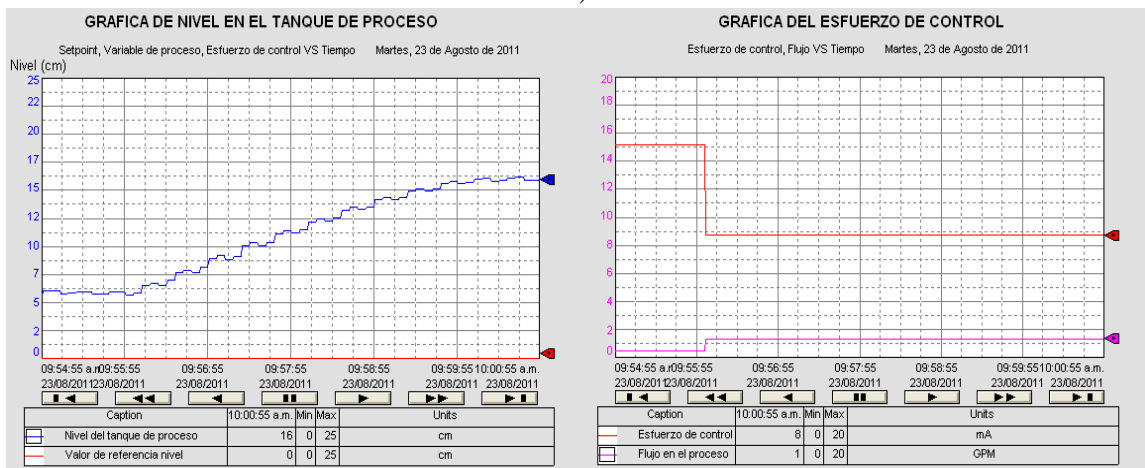
Fuente. Propia.

Con tiempos de muestreo mayor a 1.8s se presenta una situación anormal en el comportamiento del proceso, al aplicar la entrada escalón el nivel debería seguir un patrón uniforme de ascenso, en este caso no es así debido a que se presentan variaciones donde el nivel aumenta y disminuye, comportamiento inadecuado teniendo en cuenta que se presenta un flujo estable; además de esto se pierde gran nivel de detalle en los datos, acción que es contraproducente para procesos con dinámicas demasiado rápidas. Por ejemplo, para un tiempo de 3s la gráfica presenta subidas y bajadas en su nivel, comportamiento impropio del sistema analizado, ver **Figura 38.a**; para un tiempo de 6s es fácilmente observable el comportamiento errático del proceso con aumentos y descensos muy pronunciados en el nivel, ver **Figura 38.b**.

Figura 38. Respuesta temporal del sistema en el computador 1 con tiempo de muestreo. a) 3s, b) 6s.



a)



b)

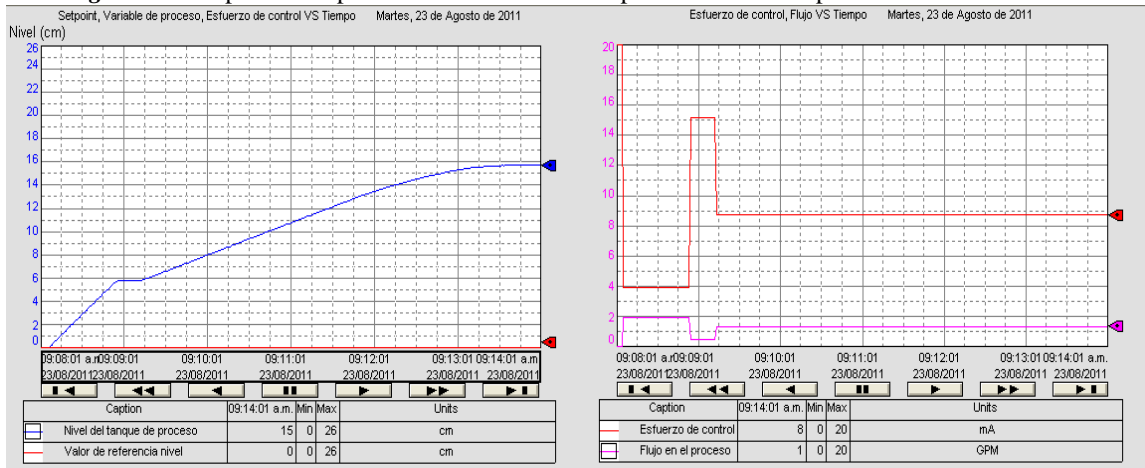
Fuente. Propia.

Computador 2

Se realizó esta prueba en un computador con sistema operativo Windows 8 (64 bits), Intel Core i7, procesador de 2.2 Ghz y 12 GB de memoria RAM; en este se trabajó la máquina virtual “Windows XP Professional – CadSim Plus” que contiene todos los programas que permiten la realización del entorno HILS, esta máquina virtual se ejecuta en Windows XP Professional (Service Pack 3) con Intel Core i7 de 3Gb de memoria RAM, 1 procesador con 1 núcleo y espacio de almacenamiento de 80Gb. Estas serían las mejores condiciones que se van a trabajar como ejemplo, en este caso la maquina funciona bien, corre todas las aplicaciones sin problemas, los tiempos de espera para abrir las aplicaciones son mínimos. A continuación se presentan los resultados de la prueba de respuesta temporal ante cambios del periodo de muestreo:

El tiempo de muestreo mínimo posible con el que la planta virtual puede trabajar es de 180ms, con este valor se presentan los mejores resultados respecto a la similitud con el proceso real, ver **Figura 39**.

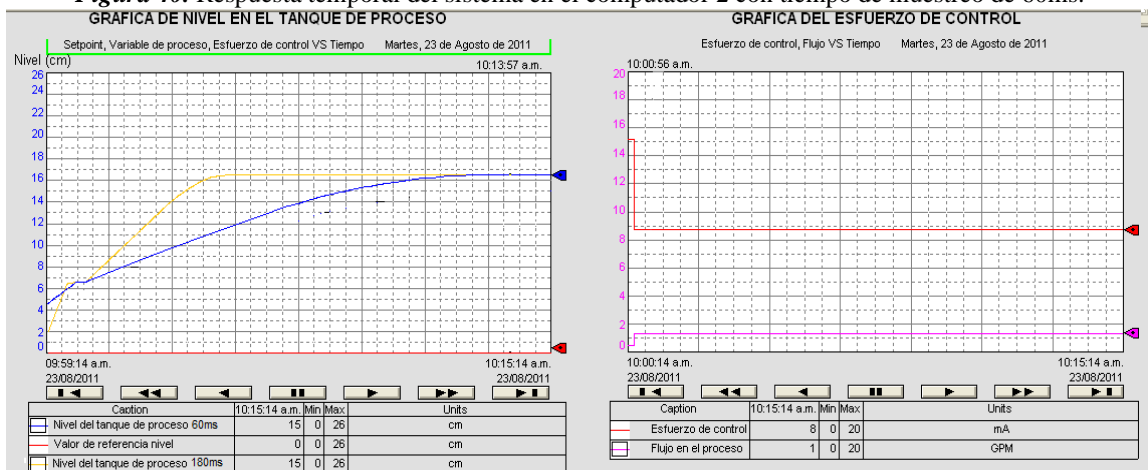
Figura 39. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo de 180ms.



Fuente. Propia.

Con tiempos de muestreo menores a 180ms el proceso pierde su dinámica y su comportamiento es diferente al del proceso real, por ejemplo, para un tiempo de 60ms la planta virtual se ralentiza (línea azul), ver **Figura 40**.

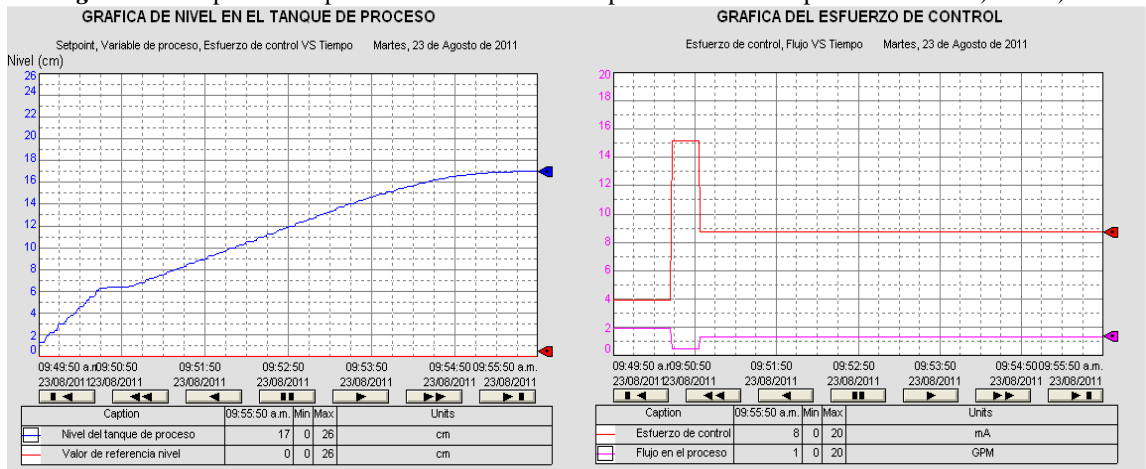
Figura 40. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo de 60ms.



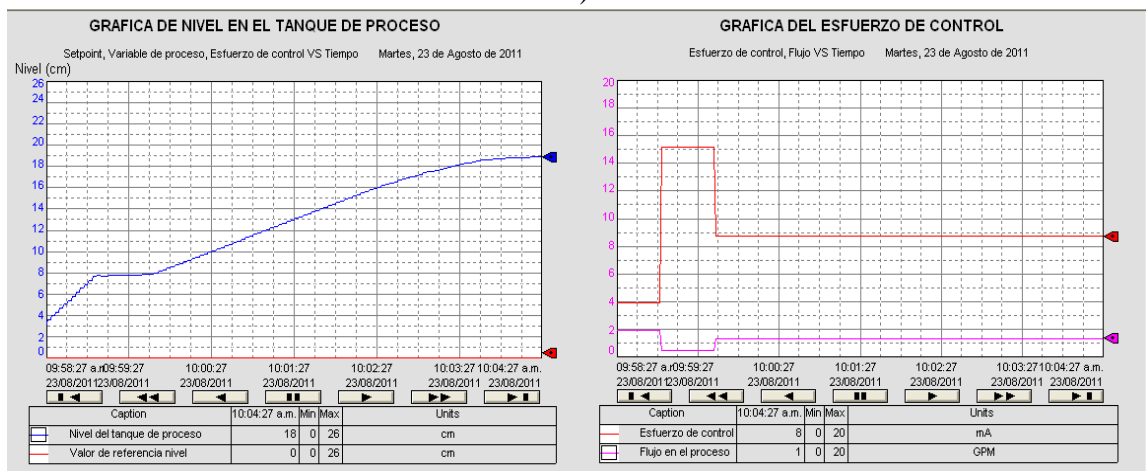
Fuente. Propia.

Con tiempos de muestreo de 1.8s y 3s la planta virtual puede trabajar aun con resultados aceptables, aunque en la respuesta del sistema se comienzan a observar datos escalonados, ver **Figura 41**.

Figura 41. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo a) 1.8s b) 3s.



a)

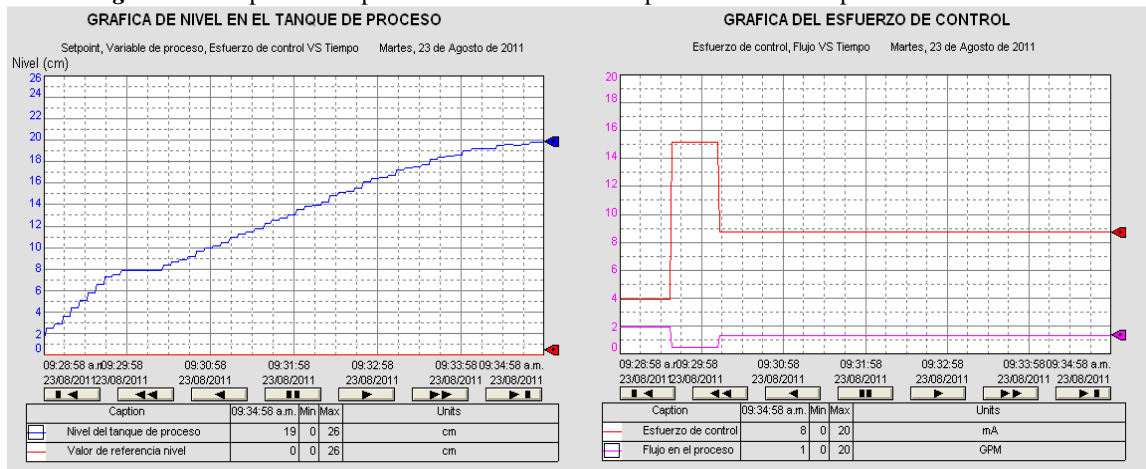


b)

Fuente. Propia.

El tiempo de muestreo máximo posible con el que la planta virtual puede trabajar es 6s, con este valor se presentan resultados aceptables, aunque la respuesta del sistema prácticamente se presenta en escalones, ver **Figura 42**.

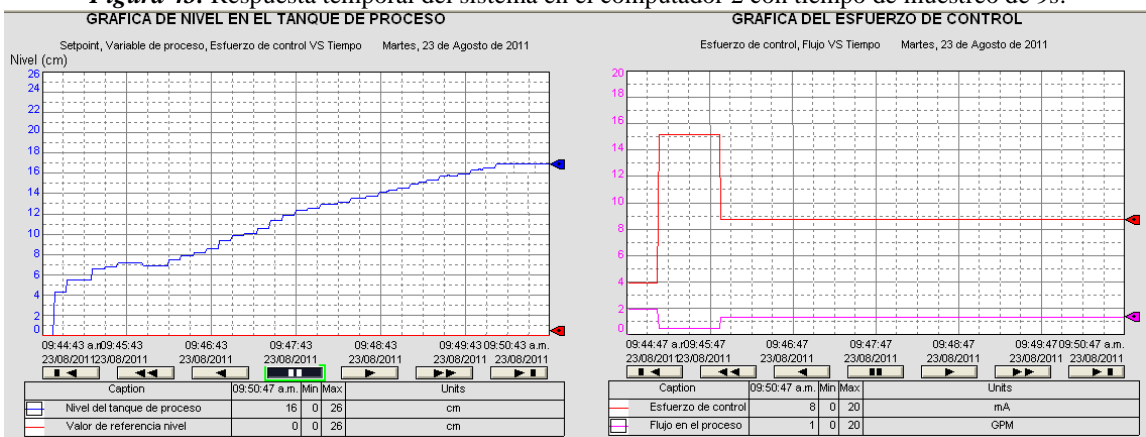
Figura 42. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo de 6s.



Fuente. Propia.

Con tiempos de muestreo mayor a 6s se pierde gran cantidad de detalle en los gráficos del proceso, por lo cual no es recomendable trabajar con estos valores, ver **Figura 43**.

Figura 43. Respuesta temporal del sistema en el computador 2 con tiempo de muestreo de 9s.



Fuente. Propia.

A partir de los resultados obtenidos en esta prueba se obtuvieron dos conclusiones:

- Para el mínimo tiempo de muestreo se obtiene un resultado similar al de [58], en donde a partir de los diferentes ensayos y simulaciones realizadas en los dos computadores, se determina que el mínimo tiempo de muestreo que puede utilizarse para este entorno HILS es de 180ms.

Se presentan las señales obtenidas del simulador en el supervisorio, en la **Figura 35** se presenta la repuesta temporal para 180ms, y en la **Figura 36** la respuesta temporal para 60ms. La simulación con un tiempo de muestro de 60ms presenta un

retraso de la señal respecto a la simulación de referencia, debido a utilizar un tiempo de muestreo demasiado reducido.

Estos resultados se deben a que el entorno HILS no es capaz de proporcionar el resultado de la simulación dentro del periodo especificado por el tiempo de muestreo, es decir, el lazo de control y simulación no pueden realizar todas sus operaciones dentro del periodo especificado de 60ms y devuelve los resultados en ciclos posteriores de simulación siendo esta la razón del retraso en la señal. Este fenómeno desaparece con un tiempo de muestreo mayor o igual a 180ms.

- El máximo tiempo de muestreo que puede utilizarse para este entorno HILS a partir de los diferentes ensayos y simulaciones realizadas en los dos computadores es de 6s, ver **Figura 42**, este tiempo de muestreo concuerda con el tiempo obtenido de forma teórica según el método de identificación por curva de reacción, ver **Anexo I**, para el método de *ho et al* el proceso simulado presenta un modelo de primer orden con un τ de un 69.87s, con base en este tiempo se definió el tiempo de muestreo máximo del sistema. Dado que generalmente se acostumbra a tomar muestras con periodos 10 veces menores al tiempo más grande del modelo, para que haya integridad en la señal [28]. Obteniendo de esta forma un $\tau = 6.987s$, tiempo que se ajusta al de las pruebas realizadas.

Esta prueba permitió descubrir que el máximo tiempo de muestreo se ve afectado por las características hardware del componente computador, esto se corrobora dado que bajo las mismas condiciones de funcionamiento para el **computador 1** la respuesta del sistema presenta un comportamiento impropio de este, como se puede ver en las **Figura 38.a** y **Figura 38.b**; referente al **computador 2** se puede ver en las **Figura 41** y **Figura 42** resultados aceptables para el sistema. De esta forma se concluyó que el máximo tiempo de muestreo es directamente proporcional a las características del computador, entre mejores características tenga el computador mayor va a ser el valor del máximo tiempo de muestreo.

3.4.3. Prueba de control

Esta prueba consistió en el análisis de la respuesta del sistema ante la implementación de un controlador PID, permitiendo comparar el funcionamiento de la planta real y la virtual, se hizo uso de un controlador obtenido mediante la realización de la práctica de control de nivel de la planta virtual Amatrol, para ver la guía de esta práctica ir al **Anexo J**. A continuación, se presentan los resultados de esta prueba.

El controlador ingresado fue:

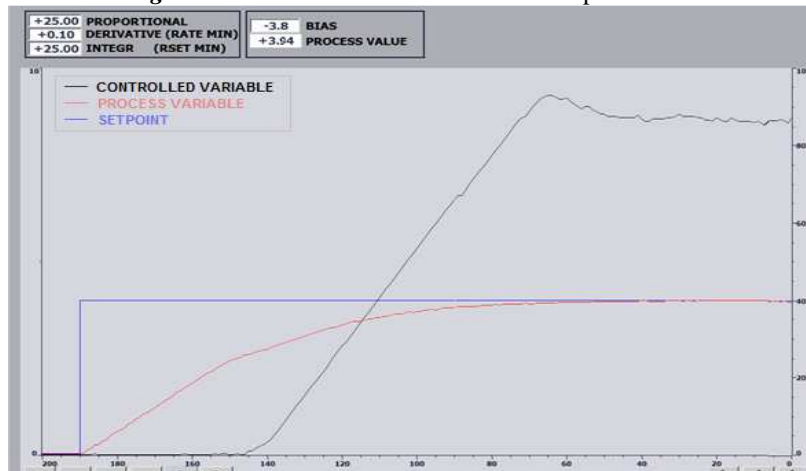
$$K_p = 25,152 \frac{mA}{cm}$$

$$K_i = 1,242 \frac{mA}{cm \cdot seg}$$

$$K_d = 2,576 \frac{mA \cdot seg}{cm}$$

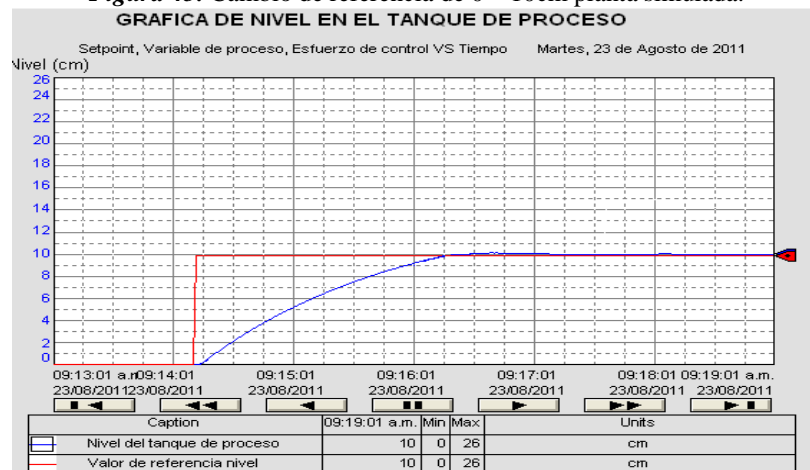
Se realizó el procedimiento de la guía iniciando con un cambio de referencia de 0 a 10cm para la planta virtual y su equivalente para la planta real de 0 a 4in, ver **Figura 44** y **Figura 45**.

Figura 44. Cambio de referencia de 0 - 4in planta real.

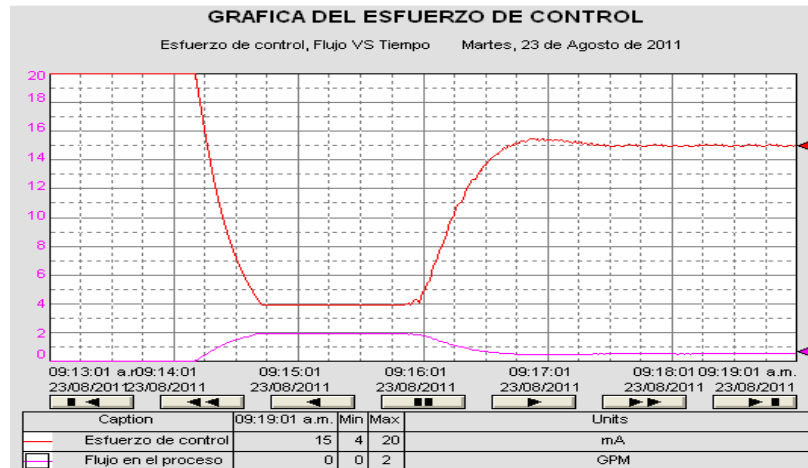


Fuente. Propia.

Figura 45. Cambio de referencia de 0 – 10cm planta simulada.



a)

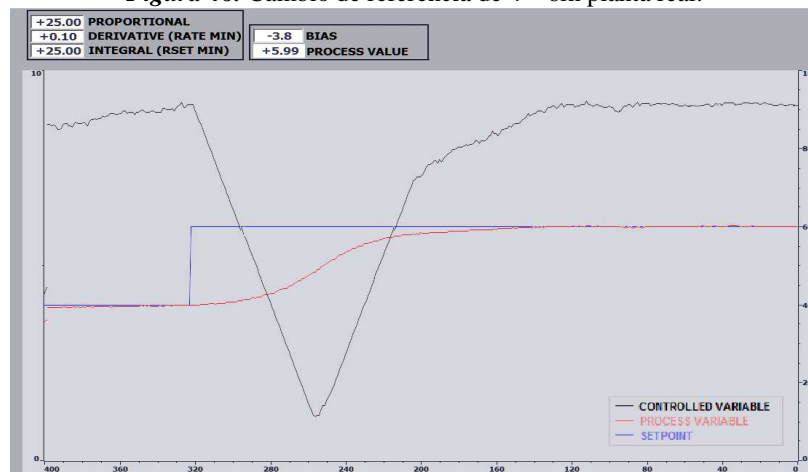


b)

Fuente. Propia.

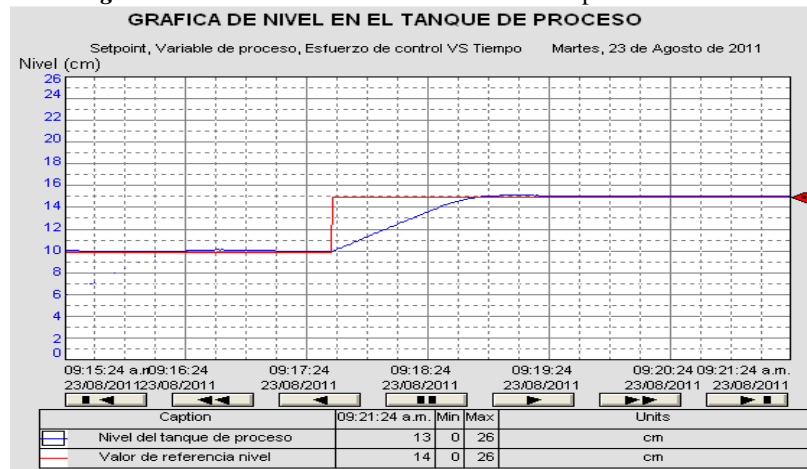
Posteriormente se hizo un cambio de referencia de 10 a 15cm para la planta virtual y su equivalente para la planta real de 4 a 6in, ver **Figura 46** y **Figura 47**.

Figura 46. Cambio de referencia de 4 – 6in planta real.

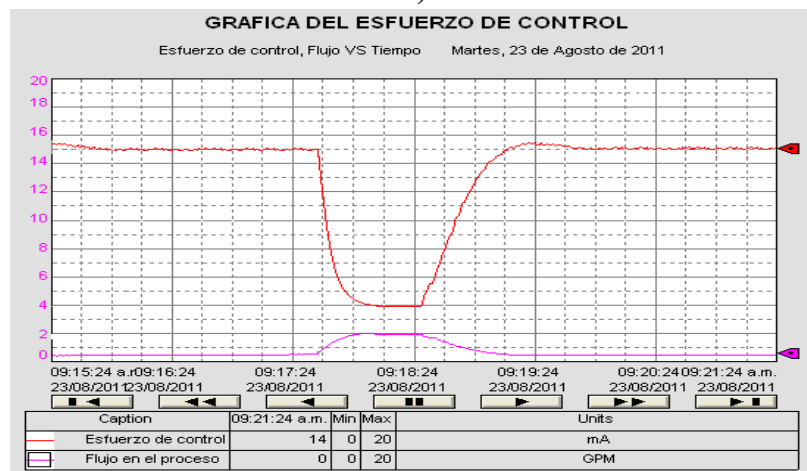


Fuente. Propia.

Figura 47. Cambio de referencia de 10 – 15cm planta simulada.



a)

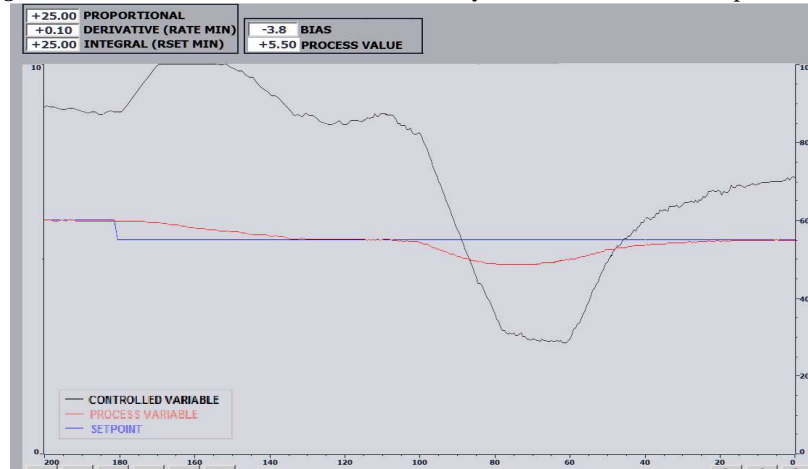


b)

Fuente. Propia.

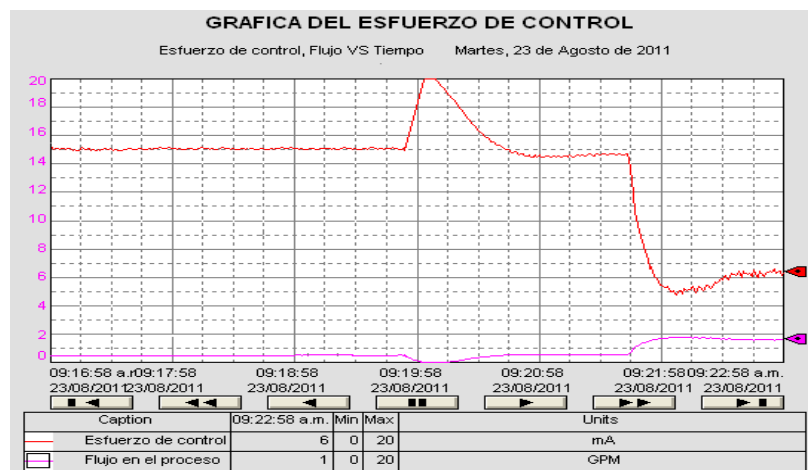
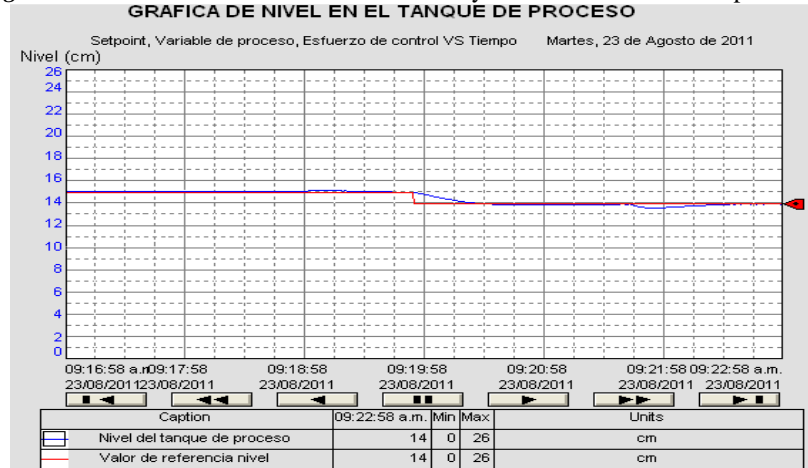
Se finalizó con un cambio de referencia de 15 a 14cm para la planta virtual y su equivalente para la planta real de 6 a 5.5in, y posterior el ingreso de un disturbio, ver **Figura 48** y **Figura 49**.

Figura 48. Cambio de referencia de 6 – 5.5cm y activación de disturbio planta real.



Fuente. Propia.

Figura 49. Cambio de referencia de 6 – 5.5cm y activación de disturbio planta real.



Fuente. Propia.

Gracias a los resultados de la prueba, se concluyó que la planta simulada y la real tienen un buen grado de similitud en su funcionamiento, al momento de realizar el control de nivel mediante un controlador PID, se puede observar como los dos procesos tienen una dinámica similar y responden de manera parecida a los cambios del esfuerzo de control, particularmente para este controlador los dos sistemas no presentan sobreimpulso y tienen tiempos de estabilización similares.

3.5. Refinamiento del laboratorio virtual en el entorno HILS

Para comprobar el adecuado funcionamiento del laboratorio virtual, se realizó una prueba que permitiera realizar ajustes y solucionar problemas. Esta prueba de refinamiento fue fundamentada en una práctica de laboratorio con su respectiva guía, la cual se basó en la implementación de un controlador PID para el control de nivel de la planta virtual, ver **Anexo F**. Esta prueba se hizo con seis estudiantes de último semestre de Ingeniería en Automática Industrial, se dividieron dos en grupo y cuatro de forma individual; al final de la práctica se registraron sus opiniones y valoraciones en aspectos de la guía y el laboratorio virtual, permitiendo una retroalimentación, ver **Tabla 27**.

Tabla 27. Síntesis de las pruebas realizadas para el refinamiento del laboratorio virtual.

Estudiante	Duración (h:min:s)		Comportamiento del estudiante en la practica	Recomendaciones del estudiante
1 y 2	Marco teórico	0:08:11	Uno de los estudiantes interactuó con el entorno, mientras que el otro se dedicó a leer la guía de laboratorio.	Faltan pasos en algunas etapas de la sección del procedimiento.
	Puesta a punto	0:29:01		
	Proceso de control	0:13:49	Hubo una pérdida deliberada de tiempo en conversaciones de temáticas diferentes a las del ejercicio, que repercutió en la duración de la práctica. El estudiante que leyó la guía interactuó menos en el laboratorio virtual.	Faltan imágenes en algunos pasos del procedimiento, que faciliten la comprensión de lo que se debe realizar.
	Total	0:51:01		Se debe mejorar la redacción en algunos pasos, para que sea más claro lo que se desea hacer. Agregar otra pantalla en la supervisión que brinde detalles sobre el proceso.
3	Marco teórico	0:06:43	El estudiante realizó la lectura del marco teórico sin problemas, en la puesta a punto, se reflejaron en él algunas dudas respecto a la configuración de las herramientas software, y en el proceso de control no tuvo inconvenientes.	Falta claridad en algunos pasos; no sabía cómo hacer lo que se pedía.
	Puesta a punto	0:18:55		Faltaron imágenes más detalladas en los pasos donde hay que seleccionar un botón.
	Proceso de control	0:08:55		Reducir el tamaño de imágenes muy grandes, que presentaban información innecesaria.
	Total	0:34:33		
4	Marco	0:07:10	El estudiante hizo las tres etapas de	Ausencia de un enunciado al iniciar

	teórico		la guía sin problemas.	<p>cada etapa de la puesta a punto del procedimiento, que describa el proceso que se va a realizar.</p> <p>Ausencia de un enunciado al finalizar cada etapa, que indique que el software ya configurado no se debe cerrar, sino minimizar.</p> <p>En la supervisión no iniciar el flujo por el circuito al presionar el botón del circuito si no agregar un botón de iniciar, esto con la finalidad de no iniciar un flujo inadecuado en caso de presionar un botón indebido.</p>
	Puesta a punto	0:16:25		
	Proceso de control	0:14:30		
	Total	0:37:05		
5	Marco teórico	0:08:50	<p>El alumno realizó la lectura del marco teórico y la puesta a punto sin problemas, en el proceso de control reflejó dudas sobre los controladores PID.</p>	<p>Mejorar la organización del supervisorio, de tal forma que las pantallas no estén tan saturadas de información.</p> <p>Faltaron etiquetas que permitieran diferenciar las variables en la pantalla, de las gráficas del supervisorio.</p> <p>Esclarecer en la guía en qué sitio exacto, se encuentra cada botón que se va a presionar en las herramientas software.</p>
	Puesta a punto	0:15:23		
	Proceso de control	0:11:55		
	Total	0:36:08		
6	Marco teórico	0:08:24	<p>El estudiante hizo la lectura del marco teórico y la puesta a punto de forma normal, en el proceso de control expresó inquietudes sobre el elemento final de control.</p>	<p>Mejorar la organización de los botones y las entradas numéricas de los instrumentos, para que sea fácil encontrarlos en el supervisorio.</p> <p>Agregar al marco teórico una sección que brinde información más detallada de la válvula de control.</p>
	Puesta a punto	0:10:19		
	Proceso de control	0:13:00		
	Total	0:31:43		

Fuente. Propia

Esta prueba de refinamiento permitió encontrar puntos débiles que repercutieron en ajustes al método de aprendizaje, la guía de práctica y el supervisorio de la aplicación, estos se muestran a continuación:

3.5.1. Ajustes al método de aprendizaje

- Se corrobora que la mejor forma de hacer las prácticas es individual, debido a que su implementación no permite una inmersión completa de dos estudiantes, además de incrementarse la duración de la misma, por la realización de actividades ajenas a las académicas.
- Se dividió la guía en dos secciones, la primera con la parte teórica y la segunda con la procedimental, con el fin de que no se omitiera la lectura del marco teórico, y se dificultara entrelazar la teoría con la práctica.

- Se estableció un tiempo promedio para realizar la práctica de 35 min 46 s; en el marco teórico 7 min 52 s, en la puesta a punto 15 min 16 s, y en el proceso de control 12 min 38 s. Para la evaluación de las pruebas el tiempo se aproximó a 36 min 0 s en total, repartiendo 8 min al marco teórico, 15 min a la puesta a punto y 13 min al proceso de control.

3.5.2. Ajustes a la guía

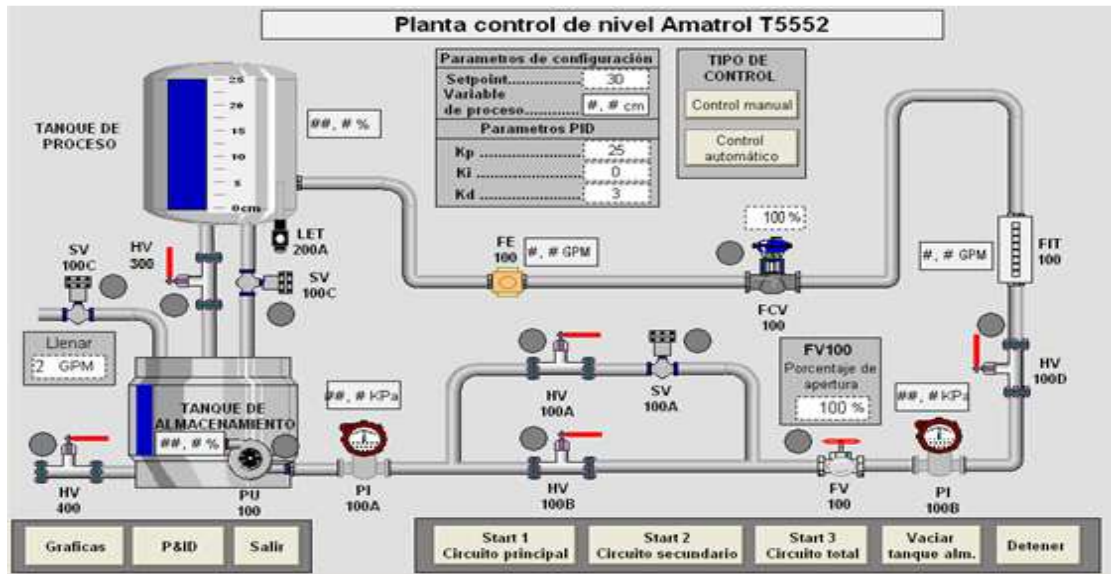
- Se mejoró la guía agregando imágenes, en algunas secciones que no eran de fácil comprensión con solo texto, especialmente, donde no era fácil identificar el paso a seguir. También, se corrigió la redacción y se agregaron ciertos pasos faltantes.
- Se recortaron imágenes muy grandes y se centró la atención en el punto de interés en estas.
- Se añadieron descripciones al inicio y al final de cada etapa del procedimiento, para mejorar el entendimiento.
- Se colocaron imágenes dentro de la guía para ubicar más rápidamente botones, ventanas y pestañas usadas en las herramientas software.

3.5.3. Ajustes al supervisorio

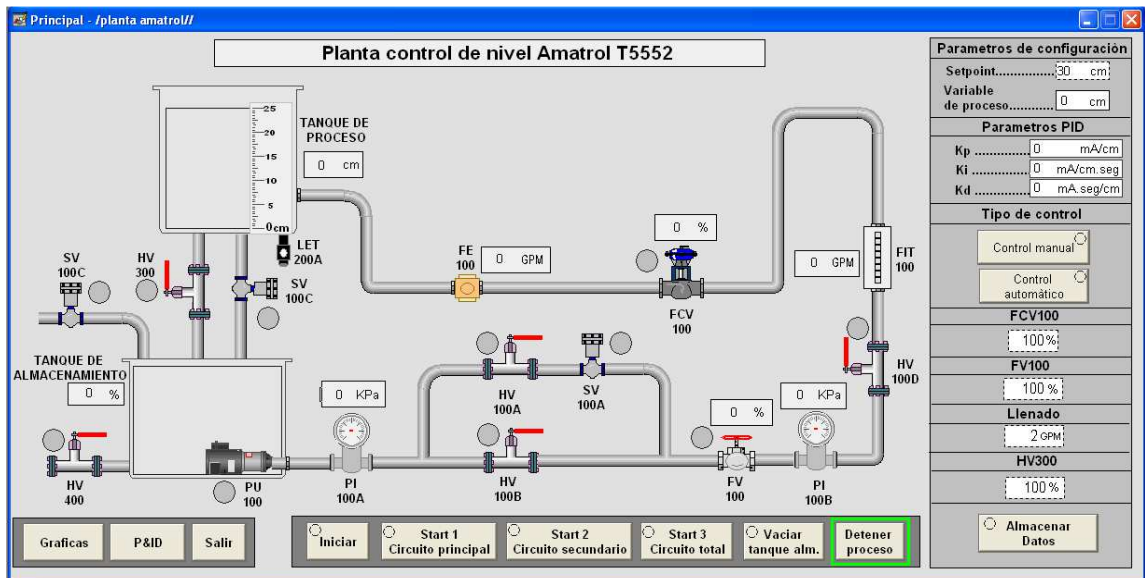
- En la pantalla principal, se redimensionaron la mayoría de los instrumentos para que se pudieran adecuar al tamaño de la pantalla, simplificando la interfaz para que fuera más intuitiva.
- Se agregó una tercera pantalla denominada P&ID, la cual presentó la descripción de la planta, sus circuitos de recorrido y diagrama P&ID.
- Se agregó un botón de inicio que permitiera empezar el flujo por el circuito y al mismo tiempo ayudara como medida preventiva ante una mala elección del circuito hidráulico a recorrer.
- Se organizaron los botones y las entradas numéricas en un recuadro al lado derecho de la pantalla principal, con el objetivo de que todas las configuraciones de control quedaran juntas y fueran más fáciles de ubicar. Lo mismo se hizo en la pantalla de

gráficas, en la cual se ubicaron las configuraciones de control en un cuadro en la parte inferior derecha, ver **Figura 50**.

Figura 50. Mejoras a la pantalla principal. a) Antes. b) Después.



a)



b)

Fuente. Propia

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL SOPORTADO EN EL ENTORNO HILS

En este capítulo se aplicó un método de evaluación para el laboratorio virtual soportado en HILS. Este se hizo realizando tres pruebas:

1. Un grupo de estudiantes A realizó la práctica en el laboratorio virtual soportado en el entorno HILS
2. Un grupo de estudiantes B realizó la práctica en el laboratorio Amatrol
3. Un grupo de estudiantes C realizó la práctica en ambos, Virtual y Amatrol.

Una vez terminada cada prueba los estudiantes presentaron un examen de conocimientos alrededor de las temáticas experimentadas en la práctica. Con el procesamiento de estos datos se buscó determinar la influencia del laboratorio virtual HILS en las prácticas de control de procesos. La evaluación conllevó una serie de pasos los cuales se desarrollan a continuación:

4.1. Cálculo de la muestra de estudiantes para la evaluación

Se plantea la utilización de una muestra de estudiantes con el objetivo de obtener una representación de la población de estudiantes del PIAI que puedan presentar un examen de conocimientos en la temática de “control industrial de nivel”.

4.1.1. Marco teórico sobre selección de una muestra.

La población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones [59] y la muestra es un subgrupo de la población del cual se recolectan los datos y debe ser representativo de ésta [60]. Debido a que el cálculo del tamaño de la muestra es uno de los aspectos más importantes de una investigación y que a su vez le brinda un grado de credibilidad mayor a los resultados, es de vital importancia obtener un tamaño idóneo para la muestra, en este caso se utilizó la ecuación (3), una de las más utilizadas para realizar este cálculo.

$$n = \frac{K^2 * p * q * N}{(e^2 * (N - 1)) + K^2 * p * q} \quad (3)$$

En donde:

N: es el tamaño de la población.

K: es una constante que depende del nivel de confianza que se desee asignar. El nivel de confianza indica la probabilidad de que los resultados sean ciertos.

e: es el error muestral deseado, indica la precisión del resultado (Error máximo admisible en términos de proporción).

p: es la proporción esperada de individuos que poseen en la población la característica de estudio.

q: es la proporción de individuos que no poseen esa característica.

n: es el tamaño de la muestra.

4.1.2. Procedimiento para la selección de la muestra

El siguiente procedimiento detalla la forma de seleccionar la muestra correcta de estudiantes respecto a la población:

- ***Plantear el caso sobre el cual se van a recolectar los datos***: se estudió un universo de alumnos de ingeniería en Automática Industrial que puedan aprobar un examen de conocimientos basado en una temática del curso de LCP con una calificación superior o igual al 60%, consistente en un grupo de 30 estudiantes que están cursando el laboratorio de control de procesos.
- ***Delimitar la población***: para esta delimitación se respondió la siguiente pregunta *¿a qué población se aplica el caso?*

Este caso se aplicó a todos los estudiantes del programa de ingeniería en automática industrial, que cursan actualmente la materia de laboratorio de control de procesos.

Luego de esto se respondió la pregunta *¿Por qué el caso es aplicado a esta población?*

El caso es aplicado a esta población ya que es la idónea para validar el proyecto, esto es, un entorno HILS que permita la realización de prácticas de control de procesos industriales con PLC en un laboratorio virtual, debido a que el curso de LCP es el único espacio en el que se vincula de forma directa el método de aprendizaje basado en prácticas en laboratorios.

- ***Selección de la muestra***: se usó la ecuación (3), para obtener una muestra probabilística en la cual todos los estudiantes de la población tienen la misma posibilidad de ser escogidos.

$$N = 30$$

$K = 1.65$, obteniendo un nivel de confianza del 90%

$$e = 13\%$$

$p = 0.90$, debido a que se espera que el 90% de los estudiantes saquen una calificación superior a 60%.

$q = 0.10$, debido a que el 10% aproximadamente se espera no saque una calificación superior a 60%.

$$n = \frac{(1,65)^2 * 0.90 * 0.10 * 30}{(0.13^2 * (30 - 1)) + 1,65^2 * 0.90 * 0.1} = 10$$

Se obtuvo un valor para la muestra de $n = 10$, con una muestra de cantidad los resultados brindan un nivel de confianza del $90\% \pm 13\%$, con una probabilidad de equivocarse del 10%.

4.2. Diseño experimental

Se propone un diseño experimental mediante la realización de una prueba experimental tipo práctica de laboratorio y su posterior evaluación con examen de conocimientos. Se realizaron tres pruebas experimentales en la misma temática, vinculadas a tres prácticas implementadas con variaciones con una muestra de diez (10) estudiantes cada una, las prácticas fueron:

- Práctica de control de nivel en el laboratorio virtual soportada en el entorno HILS
- Práctica de control de nivel en el laboratorio Amatrol.
- Práctica de control de nivel en conjunto, iniciando en el laboratorio virtual y finalizando en el laboratorio Amatrol

Cada prueba estuvo orientada por una guía dividida en cinco secciones: introducción, objetivo, prerrequisitos, fundamentos teóricos y procedimiento. A continuación, se describe el procedimiento utilizado para la realización de las tres pruebas:

- En la primera, se contó con diez (10) alumnos que participaron de forma individual y no simultánea, a cada uno se le entregó una guía, la misma que fue usada durante la validación del laboratorio virtual soportado en el entorno HILS, ver **Anexo F**. Los estudiantes contaron con 8 minutos para leer la sección teórica y con 28 minutos para realizar la parte práctica, repartidos así: 15 minutos a la puesta a punto y 13 minutos al proceso de control. Al finalizar, se les entregó un examen de

conocimientos sobre la actividad desarrollada, que debía ser solucionado en 14 minutos, ver **Anexo G**, para un total general de tiempo de 50 minutos.

- En la número dos estuvieron otros diez (10) alumnos, el procedimiento que se siguió fue igual que en la primera, incluyendo el tiempo y el examen; la diferencia radicó en que la prueba se hizo en el laboratorio Amatrol T5552, a través de una guía que fue adaptada de [57], ver **Anexo F**.
- En la tercera existió otro grupo conformado por diez (10) estudiantes, que tuvieron que desarrollar las dos pruebas mencionadas bajo las mismas condiciones, iniciando en el laboratorio virtual y continuando con el Amatrol, para recibir al final un solo examen evaluando ambas prácticas.

Para mayor claridad del formato de la evaluación, ver **Tabla 28**.

Tabla 28. Ficha técnica de la evaluación del laboratorio virtual.

Grupo A	Grupo B	Grupo C	
10 estudiantes	10 estudiantes	10 estudiantes	
Laboratorio virtual	Laboratorio Amatrol	Lab. Virtual	Lab. Amatrol
1 examen de 19 preguntas por estudiante	1 examen de 18 preguntas por estudiante	1 examen de 19 preguntas por estudiante	
Tiempo por estudiante: 8 min teoría, 28 min práctica, 14 min prueba	Tiempo por estudiante: 8 min teoría, 28 min práctica, 14 min prueba	Tiempo por estudiante: 8 min teoría, 56 min práctica, 14 min prueba.	

Fuente. Propia

Estas pruebas tuvieron en cuenta los conocimientos que normalmente se utilizan a la hora de realizar una práctica en el LCP del PIAI, por lo cual se diseñó un examen de diecinueve (19) preguntas para el Lab. Virtual y el Virtual-Amatrol; y dieciocho (18) preguntas para el Lab. Amatrol. Estos se dividieron en cinco secciones: diagramas de planta, instrumentación, lógica de control, válvula de control y comunicaciones, a continuación se expone cada sección:

- **Diagramas de la planta:** se preguntó respecto a los diagramas PFD y P&ID de la planta objeto de estudio.
- **Instrumentación:** se plantearon preguntas respecto a las variables del proceso, el esquema de control, la acción de control, la clasificación del sistema y la clasificación de disturbios.
- **Lógica de control:** se diseñaron preguntas sobre esquemas de control, acciones de control y respuesta del sistema.

- **Válvula de control:** preguntas relacionadas al elemento final de control, como: su clase y tipo de accionamiento, y tipo de válvula.
- **Comunicaciones:** se interrogó sobre las redes, estándares y arquitecturas que permitieron la comunicación.

Para ver el formato del examen de conocimientos realizado ir al **Anexo G**.

4.3. Evaluación del laboratorio virtual

La evaluación se realizó en dos sesiones:

La **primera** sesión se realizó el día jueves 31 de agosto del año 2017, en el horario de 2-6pm con 16 estudiantes del curso de laboratorio de control de procesos dirigido por el Ing. Ary Fernando Piso Ordoñez, con ellos se hicieron dos pruebas, la del laboratorio virtual y la del laboratorio Amatrol, esto de forma separada, para ello se dividieron los estudiantes en dos grupos de ocho para realizar la práctica de forma individual.

La **segunda** sesión se realizó el día viernes 8 de septiembre del año 2017, en dos horarios de 7-11am y de 2-4pm, se realizaron las practicas con 14 estudiantes del curso de laboratorio de control de procesos orientado por el Ing. Francisco Franco Obando Díaz, en el horario de la mañana se trabajó con un grupo de 10 estudiantes, hicieron la práctica que requería trabajar en el laboratorio implementado a través del entorno HILS y posteriormente en el laboratorio Amatrol. En el horario de la tarde se trabajó con un grupo de 4 estudiantes, 2 realizaron la prueba del laboratorio virtual y los otros 2 realizaron la del Amatrol. Para mayor claridad de la evaluación, ver **Tabla 29**.

Tabla 29. Ficha técnica de las pruebas de laboratorio virtual, Amatrol y virtual-Amatrol.

Fecha	Horario	Tipo de practica	Cantidad estudiantes por practica		Docente
			Por practica	Total	
31 - 08 - 2017	2pm - 6pm	Prueba laboratorio virtual	8	16	Ary Fernando Piso Ordoñez
		Prueba laboratorio Amatrol	8		
08 - 09 - 2017	7am - 11am	Prueba laboratorio virtual-Amatrol	10	14	Francisco Franco Obando Díaz
	2pm - 4pm	Prueba laboratorio virtual	2		
		Prueba laboratorio Amatrol	2		

Fuente. Propia

4.4. Resultados de la evaluación del examen de conocimientos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el examen de conocimientos, dividido en dos partes, para ver los exámenes originales ver el **Anexo digital 2**.

4.4.1. Resultados a nivel individual y general

La primera parte presenta los resultados individuales en cada sesión de preguntas del examen para cada estudiante junto con su resultado y la media de la prueba. En la **Tabla 30** se exhiben los resultados para las tres pruebas.

Tabla 30. Resultados generales de las pruebas de evaluación del laboratorio virtual.

Respuestas								
Tipo de planta	Estudiante	Secciones de la prueba					Total	
		Diagramas de la planta	Instrumentación	Lógica de control	Válvula de control	Comunicaciones	#	(%)
		2 Preguntas	7 preguntas	4 preguntas	3 preguntas	3 preguntas	19 P	0-100 %
Planta virtual	1	1/2	6/7	3/4	3/3	2/3	15	78,95
	2	1/2	4/7	2/4	3/3	3/3	13	68,42
	3	0/2	3/7	3/4	1/3	3/3	10	52,63
	4	2/2	7/7	4/4	3/3	2/3	18	94,74
	5	0/2	4/7	3/4	3/3	3/3	13	68,42
	6	0/2	3/7	2/4	1/3	2/3	8	42,11
	7	0/2	5/7	4/4	3/3	3/3	15	78,95
	8	0/2	5/7	3/4	2/3	3/3	13	68,42
	9	0/2	4/7	4/4	3/3	1/3	12	63,16
	10	1/2	6/7	3/4	2/3	3/3	15	78,95
					Media	13	69,48	
		2 Preguntas	7 preguntas	4 preguntas	3 preguntas	2 preguntas	18 P	0-100 %
Planta Amatrol	1	0/2	5/7	2/4	3/3	2/2	12	66,67
	2	2/2	7/7	3/4	3/3	2/2	17	94,44
	3	2/2	5/7	3/4	2/3	0/2	12	66,67
	4	1/2	4/7	3/4	3/3	1/2	12	66,67
	5	1/2	5/7	1/4	2/3	2/2	11	61,11
	6	1/2	6/7	1/4	2/3	1/2	11	61,11
	7	2/2	3/7	2/4	2/3	1/2	10	55,56
	8	1/2	5/7	3/4	3/3	2/2	14	77,78
	9	1/2	4/7	1/4	3/3	1/2	10	55,56
	10	1/2	6/7	4/4	2/3	2/2	15	83,33
					Media	12	68,89	

		2 Preguntas	7 preguntas	4 preguntas	3 preguntas	3 preguntas	19 P	0-100 %
Planta Virtual-Amatrol	1	2/2	7/7	3/4	3/3	3/3	18	94,74
	2	2/2	7/7	3/4	3/3	3/3	18	94,74
	3	2/2	7/7	3/4	3/3	2/3	17	89,47
	4	2/2	6/7	3/4	2/3	2/3	15	78,95
	5	2/2	5/7	3/4	2/3	1/3	13	68,42
	6	2/2	5/7	3/4	3/3	3/3	16	84,21
	7	0/2	5/7	2/4	2/3	1/3	10	52,63
	8	1/2	5/7	3/4	1/3	2/3	12	63,16
	9	2/2	4/7	4/4	2/3	2/3	14	73,68
	10	2/2	5/7	2/4	3/3	3/3	15	78,95
						Media	15	77,90

Fuente. Propia

4.4.2. Resultados por cada sección

La evaluación se dividió en cinco secciones, a cada una se le asignó un porcentaje de 20% para un total de 100%, cada una se conformó por un determinado número de preguntas, a las cuales se les asignó un valor por igual del porcentaje de la sección correspondiente, este procedimiento se plasmó en la ecuación (4) y su resultado en la **Tabla 31**.

$$PP = \frac{P}{n} \tag{4}$$

En donde:

P = porcentaje asignado a la pregunta

n = número de preguntas

PP = porcentaje para cada pregunta

Tabla 31. Obtención de porcentaje por pregunta.

Secciones	Numero de Preguntas		Porcentaje asignado (%)	Porcentaje por pregunta (%)	
	<i>n</i>		<i>P</i>	<i>PP</i>	
Diagrama de la planta	2		20	10	
Instrumentación	7		20	2.86	
Lógica de control	4		20	4	
Válvula de control	3		20	6.67	
Comunicaciones	3	2	20	6.67	10
Total	19	18	100	--	

Fuente. Propia

Luego de hallar el porcentaje por pregunta, se procedió a contrastarlo con el número de respuestas correctas, dividido por el número total de respuestas, esto permitió obtener el porcentaje de respuestas correctas por pregunta a través de la ecuación (5), y se hizo la sumatoria de los porcentajes de respuestas correctas para cada sección, por medio de la ecuación (6), con el fin de conocer las cifras de todas las secciones, ver **Tabla 32**.

$$R = \frac{PP * C}{T} \tag{5}$$

$$S = \sum_{i=1}^n Rn = \frac{PP_n * C_n}{T} \tag{6}$$

En donde:

T = número de respuestas totales por pregunta = 10.

C = número de respuestas correctas para una pregunta.

R = porcentaje de respuestas correctas por pregunta.

S = porcentaje de respuestas correctas para una sección.

Tabla 32. Resultados por secciones de las tres pruebas de evaluación del laboratorio virtual.

Resultados											
Secciones	Preguntas		Laboratorio virtual			Laboratorio Amatrol			Lab. Virtual-Amatrol		
	n	#	C	R (%)	S (%)	C	R (%)	S (%)	C	R (%)	S (%)
Diagramas de la planta	2	1	3	3.00	5,00	6	6	12	8	8	17,00
		2	2	2.00		6	6		9	9	
Instrumentación	7	3	10	2.86	13,44	10	2.86	14,29	10	2.86	16,02
		4	10	2.86		10	2.86		10	2.86	
		5	8	2.29		5	1.43		8	2.29	
		6	2	0.57		4	1.14		5	1.43	
		7	7	2.00		9	2.57		10	2.86	
		8	7	2.00		7	2.00		8	2.29	
		9	3	0.86		5	1.43		5	1.43	
Lógica de control	4	10	8	4	15,50	10	5	11,50	5	2.5	14,50
		11	9	4.5		6	3		10	5	
		12	4	2		2	1		4	2	
		13	10	5		5	2.5		10	5	
Válvula de control	3	14	7	4.67	16,00	9	6	16,67	7	4.67	16,00
		15	10	6.67		8	5.33		8	5.33	
		16	7	4.67		8	5.33		9	6	
Comunicaciones	3	17	8	5.33	16,67	5	5	14,00	5	3.33	14,67
		18	10	6.67		9	9		10	6.67	

		19	7	4.67				7	4.67	
Total	19		132	66,60	124	68,45		148	78,17	

Fuente. Propia

4.5. Análisis de los resultados de la evaluación

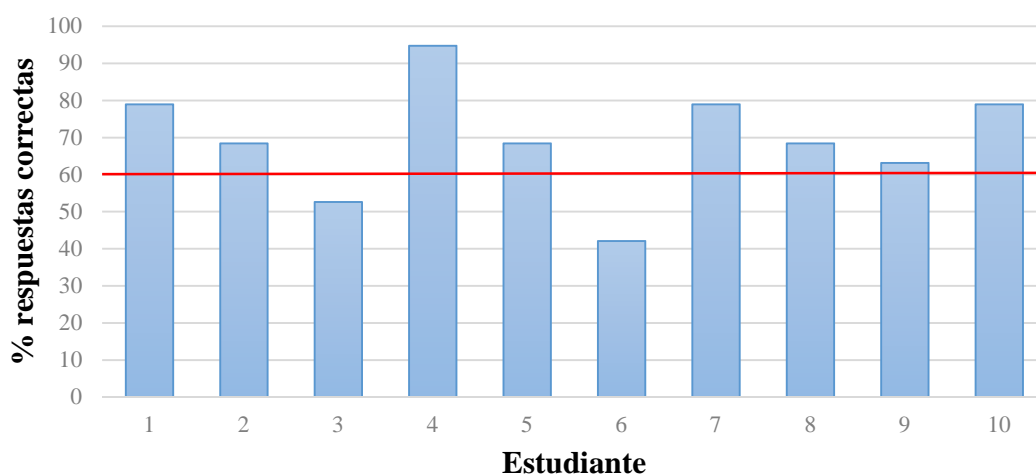
Para un análisis más preciso de los datos arrojados por la evaluación, se dividió en 3 apartados, análisis de resultados individuales, generales y por secciones.

4.5.1. Análisis resultados individuales

En este apartado se hizo un análisis directamente con los resultados individuales de los estudiantes que hicieron las pruebas, de acuerdo a ello, este análisis se dividió en: estudiantes que realizaron la prueba en el laboratorio virtual, en el laboratorio Amatrol, en ambas (Virtual-Amatrol).

- **Estudiantes que realizaron la prueba en el laboratorio virtual:** hubo dos estudiantes con resultado menores al 60%, uno con el resultado más bajo de todas las pruebas 42,11% y otro con 52.63%, el resto presentó un porcentaje bueno, con un rango entre 63.15% y 78.94%, dado que el rango de porcentaje considerado como bueno es entre 60% y 100%, basado en que el 20% de los estudiantes estuvieron por debajo del rango esperado y la proporción esperada era del 90%, no se considera este como un buen resultado, ver **Figura 51**.

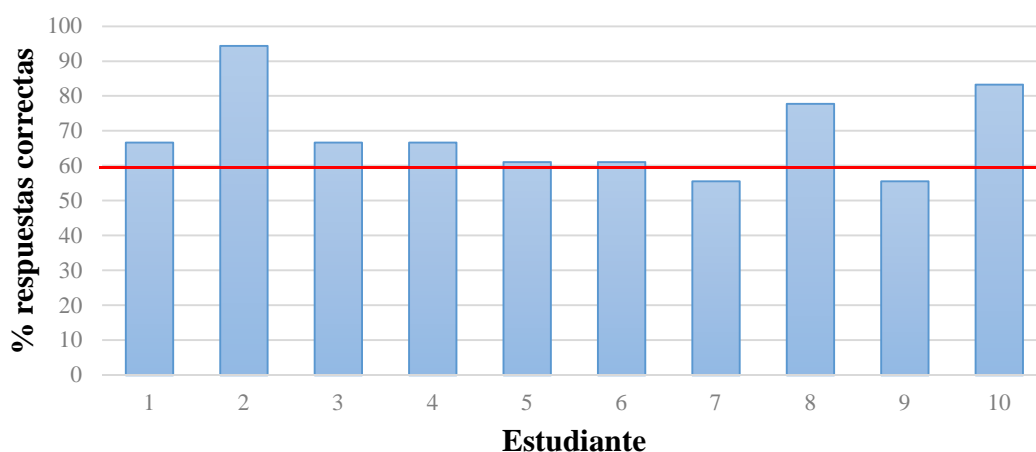
Figura 51. Porcentaje de respuestas correctas por estudiante para el Lab. Virtual.



Fuente. Propia

- **Estudiantes que realizaron la prueba en el laboratorio Amatrol:** en esta prueba no hubo estudiantes con porcentajes por debajo del 50%, los dos más bajos fueron los de 55,56%, el resto de estudiantes tuvieron resultados relativamente buenos, un estudiante tuvo su resultado entre 90% y 100%, uno entre el 80% y 90% y uno entre el 70% y 80%, y cinco estudiantes con resultados entre 60% y 70%; debido a que el 20% de los estudiantes estuvieron por debajo del rango esperado y la proporción esperada era del 90%, no se considera este como un buen resultado, ver **Figura 52**.

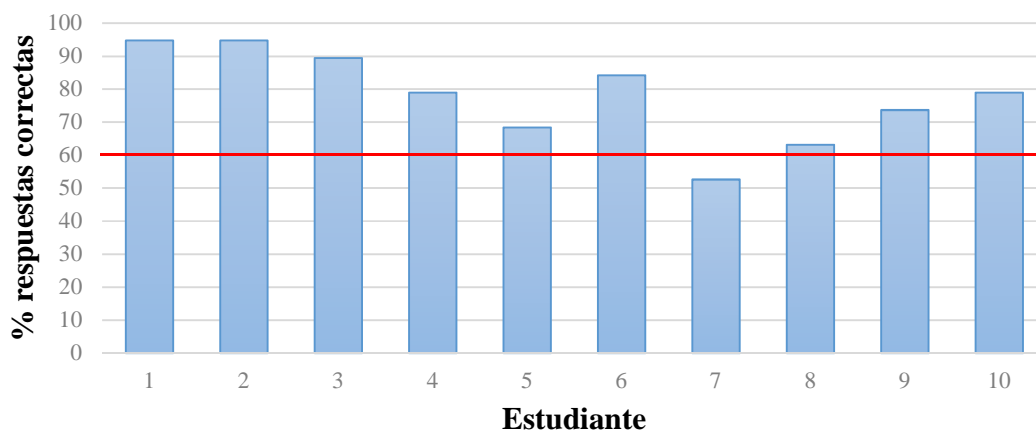
Figura 52. Porcentaje de respuestas correctas por estudiante para el lab. Amatrol.



Fuente. Propia

- **Estudiantes que realizaron la prueba en los laboratorios Virtual-Amatrol:** no hubo resultados menores al 50%, siendo solo un estudiante el más bajo con 52,63%, 7 estudiantes estuvieron por encima del 70% y dado que todos a excepción de un estudiante tuvieron el resultado esperado, esta prueba se mantuvo dentro del porcentaje esperado de 90% o más, por lo cual se considera que los resultados fueron buenos, ver **Figura 53**.

Figura 53. Porcentaje de respuestas correctas por estudiante para los Lab. Virtual-Amatrol.



De forma individual el laboratorio que obtuvo mejores resultados fue el Virtual-Amatrol cumpliendo con la proporción esperada para los resultados, en segundo lugar se encuentra el laboratorio Amatrol en el cual sus resultados negativos están muy cerca al porcentaje mínimo y por último se encuentra el laboratorio virtual en el cual sus resultados negativos se encuentran un poco más alejados del mínimo.

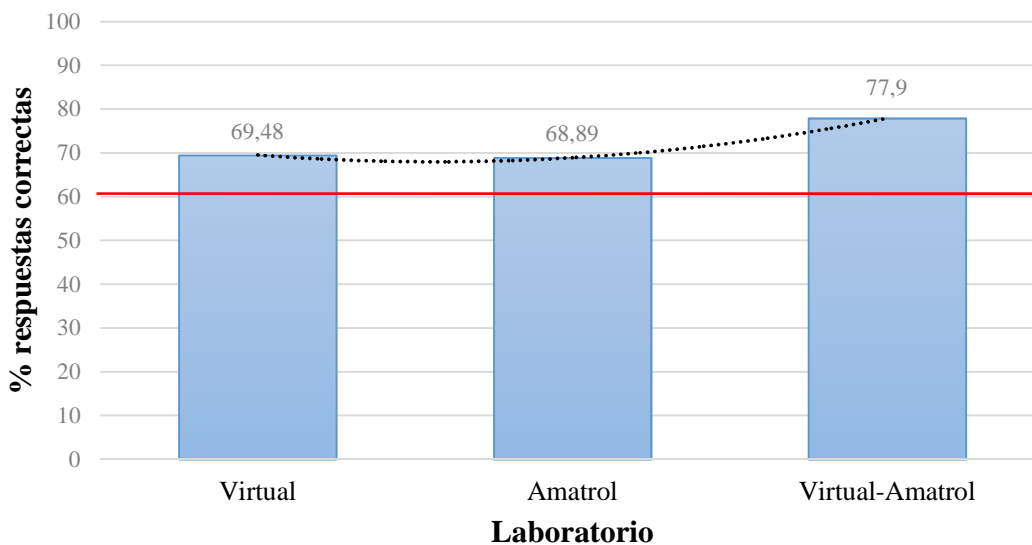
4.5.2. Análisis resultados generales

En este apartado se hizo un análisis con los resultados generales de los estudiantes que hicieron las tres pruebas.

Según este análisis, de forma general, los tres grupos de estudiantes superaron el 60% de respuestas correctas, por lo que se considera todos tuvieron una media buena, aunque el grupo que realizó la prueba en el Lab. Virtual-Amatrol obtuvo un 77,90% siendo el mejor promediado, seguido por el grupo del Lab. Virtual que obtuvo 69,48% y por último el Lab. Amatrol con un 68,89%, ver **Figura 54**.

Entre los grupos que realizaron la prueba en el Lab. Virtual y el Lab. Amatrol se diferenciaron apenas por un 0,59%, de lo que se deduce que al implementar un laboratorio virtual soportado en un entorno HILS de forma solitaria podrían obtenerse aproximadamente los mismos resultados que en un laboratorio con una planta real. Por otro lado, se puede evidenciar la eficacia y superioridad de desarrollar una misma práctica primero en un laboratorio virtual y seguidamente en un laboratorio real, dándoles la oportunidad a los estudiantes de reforzar sus conocimientos y entender mejor el proceso expuesto en la práctica.

Figura 54. Porcentaje de respuestas correctas en general por laboratorio.



Fuente. Propia

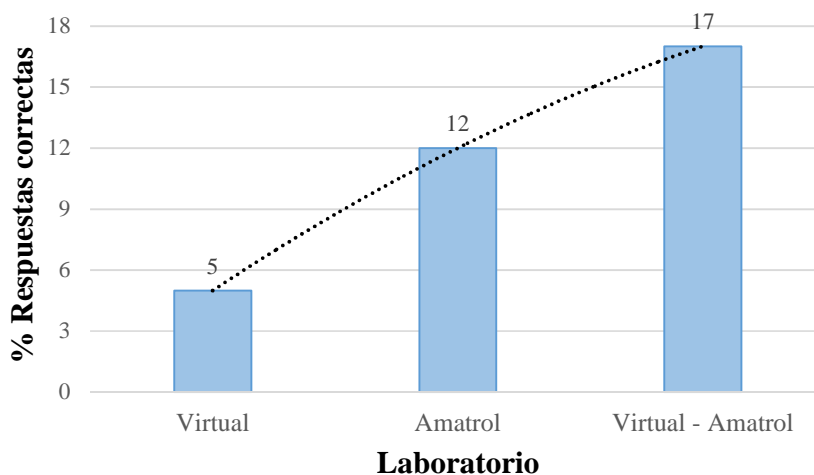
4.5.3. Análisis resultados por cada sección del examen

Se procedió a realizar el análisis para cada sección del examen de conocimientos:

- **Diagramas de la planta:** esta sección tuvo dos preguntas, de los estudiantes que realizaron la prueba en el Lab. Virtual solo el 30% respondieron correctamente la primera pregunta y un 20% la segunda; para la prueba hecha en el Lab. Amatrol, un 60% respondió bien en ambas preguntas y en la prueba con ambos laboratorios, un 80% respondió bien la primera pregunta y un 90% la segunda.

Los porcentajes generales para cada prueba fueron: 5% para el Lab. Virtual, 12% Lab. Amatrol y 17% para el Lab. Amatrol-Virtual, ver **Figura 55**, la diferencia de los resultados en esta sección estuvo bien marcada, siendo la prueba que unía ambos laboratorios la que obtuvo mejores resultados con un 12% y 5% de superioridad respectivamente ante las otras, dejando claro que los estudiantes tienden a reconocer mejor los diagramas de proceso cuando tienen la oportunidad de visualizar el proceso tanto de manera física como simulada.

Figura 55. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección diagramas de planta.



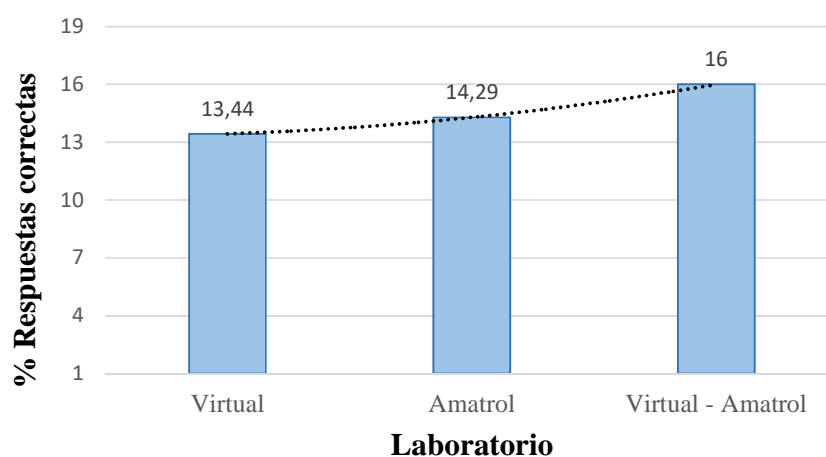
Fuente. Propia

- **Instrumentación:** contó con siete preguntas, para la prueba desarrollada en el Lab. Virtual las preguntas 3, 4, 5, 7 y 8 fueron respondidas correctamente por más del 70% de los estudiantes, en contraposición la 6 y 9 tuvieron un porcentaje bajo de estudiantes entre 20 y 30 %. En la prueba realizada en el Lab. Amatrol, las preguntas 3, 4, 7 y 8 fueron respondidas correctamente por más del 70% de estudiantes, mientras que las 5, 6 y 9 fueron correctas por alrededor del 40 y 50%. En cuanto a la prueba realizada en el Lab. Virtual-Amatrol, las preguntas 3, 4, 5, 7 y

8 fueron respondidas correctamente por la más del 80%, mientras que las 6 y 9 fueron correctas para el 50% de los estudiantes.

En esta sección las diferencias no fueron tan marcadas, aunque de nuevo la prueba que obtuvo los mejores resultados con respecto a las demás fue la desarrollada en el Lab. Virtual-Amatrol. Los porcentajes promedios de cada prueba fueron: 13.43% para el Lab. Virtual, 14.23% para Amatrol y 16% para virtual-Amatrol, ver **Figura 56**. Esta tendencia se puede deber a que estas son preguntas vinculadas directamente con las variables del proceso, clasificación del sistema y disturbio en la planta que son elementos que si no se perciben en una práctica la otra facilita la realimentación.

Figura 56. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección instrumentación.



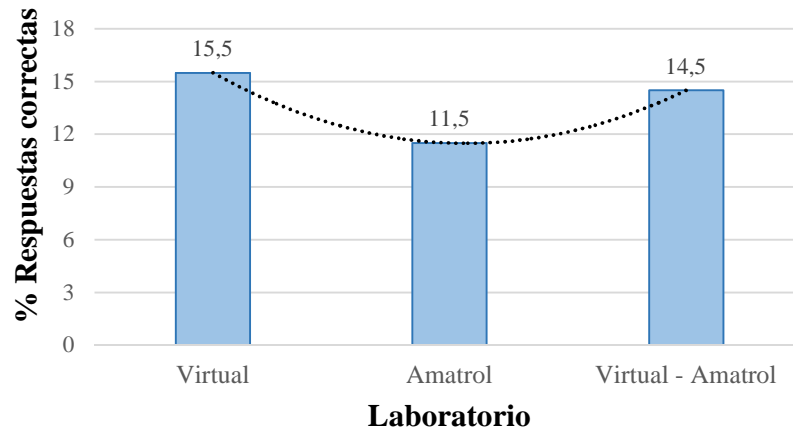
Fuente. Propia

- **Lógica de Control:** contó con cuatro preguntas, de las cuales, para la prueba desarrollada en el lab. Virtual las preguntas 10, 11, y 13 fue respondida correctamente por más del 80% de los estudiantes, mientras que la 11 solo por el 40%. En la prueba realizada en el lab. Amatrol, la pregunta 10 fue respondida correctamente por todos los estudiantes, las preguntas 11 y 13 por alrededor del 50-60% y la pregunta 12 solamente por el 20%. En cuanto a la prueba hecha en ambos laboratorios, las preguntas 11 y 13 fueron respondidas correctamente por todos los estudiantes, mientras que las 10 y 12 fueron correctas por el 40% y 50% respectivamente.

Los porcentajes generales para cada prueba fueron: 15.5% Lab. Virtual, 11.5% Amatrol y 14.5% virtual-Amatrol, ver **Figura 57**, no es factible aseverar que haya mayor apropiación de conocimiento entre el Lab. Virtual y el Virtual-Amatrol porque su margen de diferencia es poco significativo, pero entre el Lab. Virtual y el Amatrol hubo una diferencia considerable que pudo haber sido causada por el

mayor grado de detalle que presentaba la interfaz de supervisión, más exactamente en la pantalla de gráficos del Lab. Virtual.

Figura 57. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección lógica de control.

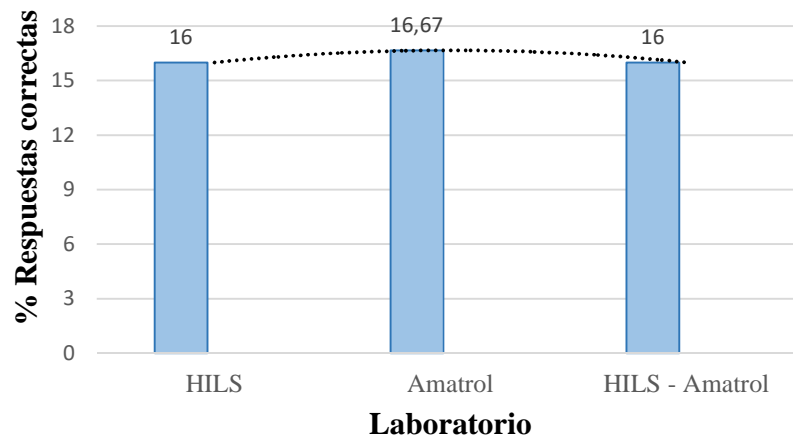


Fuente. Propia

- **Válvula de Control:** esta sección contó con tres preguntas, de las cuales, para la prueba desarrollada en el Lab. Virtual todas fueron respondidas correctamente por la mayoría de los estudiantes con un porcentaje entre 70% - 100%. En la prueba realizada solo en el Lab. Amatrol, hubo la misma tendencia con un porcentaje entre 80 y 90%. Al igual que las anteriores, la prueba hecha en Virtual-Amatrol tuvo la misma tendencia a un porcentaje entre 70% y 90% de respuestas correctas.

Los porcentajes generales para cada prueba fueron: 16% Lab. Virtual, 16.67% Amatrol y 16% Virtual-Amatrol, ver **Figura 58**, las tres pruebas tuvieron resultados aproximados al 16% de respuestas correctas, sobresaliendo el Lab. Amatrol por un 0.67%, se destacó esta sección como la más sólida en cuanto a resultados, concluyendo que los estudiantes realizaron una asimilación de este instrumento tanto de forma teórica como práctica, indiferente del tipo de laboratorio.

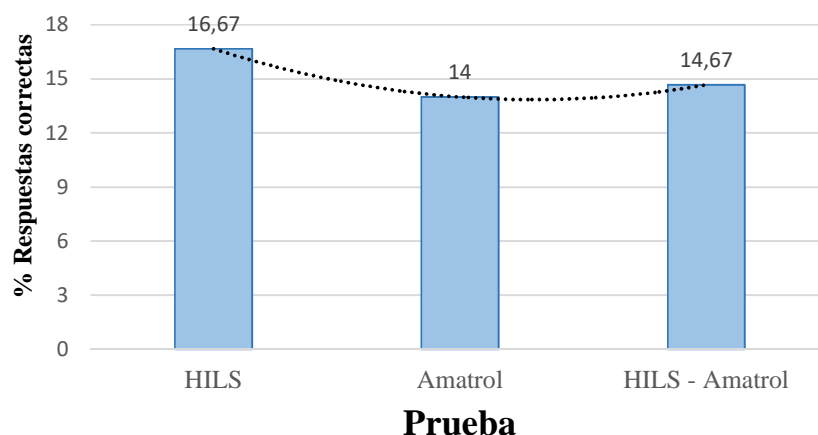
Figura 58. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección válvula de control.



- **Comunicaciones:** para la prueba en el Lab. Virtual conto con tres preguntas todas fueron respondidas correctamente por la mayoría de los estudiantes con un porcentaje entre 70% - 100%. En la prueba realizada en el Lab. Amatrol, se hicieron dos preguntas, siendo la 17 respondida correctamente por la mitad de los estudiantes y la 18 por todos los estudiantes. Para la prueba hecha en el Lab. Virtual-Amatrol, la pregunta 17 fue respondida correctamente por la mitad de los estudiantes, mientras que la 18 y 19 fue respondida correctamente por la mayoría de los estudiantes con un promedio de 100% y 70% respectivamente.

Los porcentajes generales para cada prueba fueron: 16.667% Lab. Virtual, 14% Amatrol y 14.67% Virtual-Amatrol, ver **Figura 59**, hubo un alto porcentajes de respuestas correctas en los tres laboratorios, los estudiantes entendieron en buena medida la comunicación y flujo de datos en el proceso estudiado. Debido a que en el Lab. Virtual se tenía un mayor contacto con las herramientas de comunicación, fue el de mejores resultados.

Figura 59. Porcentaje de respuestas buenas por laboratorio para la sección comunicaciones.



Fuente. Propia

De manera seccional, el laboratorio que obtuvo mejor resultado fue el Virtual-Amatrol con un 78,17%, fue alrededor de un 10% mejor que el de las pruebas realizadas en el Lab. Amatrol con un 68.45% y aproximadamente 12% que el del Lab. Virtual con un 66,60%. El Lab. Virtual-Amatrol obtiene la mayor diferencia en la sección diagramas de la planta donde obtiene un porcentaje muy superior y también en la sección instrumentación donde gana pero por un margen menor, y obteniendo porcentajes muy similares a los de los otros laboratorios en las otras tres secciones. El Lab. Amatrol gana en la sección válvula de control y obtiene porcentajes muy similares a los de las otras plantas en las demás secciones, lo que le vale para ocupar el segundo puesto. El Lab. Virtual gana en las secciones lógica de control y comunicaciones, pero se ve bruscamente afectado por su porcentaje ínfimo en la sección de diagramas de planta ocasionando que ocupe el tercer puesto.

Finalmente, a manera de análisis general se evidenció que cuando el estudiante tiene una mayor interacción con el proceso refuerza sus conocimientos, en este caso la práctica que permitía la interacción con el Lab. Virtual y Amatrol de forma conjunta presentó los mejores resultados, ver **Tabla 33**.

Tabla 33. Resultado global de la evaluación de las tres pruebas experimentales.

Laboratorio	Posición según análisis de los resultados de evaluación		
	Individual	General	Secciones
Virtual	3er puesto	2er puesto	3er puesto
Amatrol	2do puesto	3do puesto	2do puesto
Virtual-Amatrol	1er puesto	1er puesto	1er puesto

Fuente. Propia

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Gracias a la metodología de revisión sistemática llevada a cabo en la etapa inicial de este trabajo, se lograron esclarecer los entornos HILS vinculados a procesos industriales, sus respectivas estructuras, componente, herramientas y conexiones; de forma paralela se indagaron los métodos de aprendizaje basados en prácticas utilizados en los laboratorios de control; para finalmente evaluar el laboratorio virtual soportado en el entorno HILS seleccionado, y encontrar los resultados de esta investigación, con base en lo anterior se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

5.1. Conclusiones

- El uso de CADSIM Plus como simulador de procesos dinámicos e interfaz CAD permitió analizar, crear y examinar procesos industriales, implementar estrategias de control, detectar fallos, incorporar nuevos instrumentos, entre otros; todo lo precedente, sin hacer uso de una planta real (física) y por consiguiente los sobrecostos que esto vincula.
- Para simular fielmente la dinámica de un proceso a implementar en un entorno HILS deben seleccionarse las características hardware idóneas para sus componentes, dado que estas afectan directamente el rango de tiempo de muestreo del cual depende el correcto funcionamiento de la simulación.
- Como desventaja, el entorno HILS presentó retardos de tiempo, estos están directamente relacionados con las características hardware del computador en el cual se implemente, sin embargo, estos retardos son muy pequeños y poco frecuentes por lo cual no comprometen el funcionamiento del laboratorio virtual.
- La función más importante en un entorno HILS en marcha es la supervisión por medio del HMI del SCADA. debido a que es el único medio por el cual se puede interactuar directamente con el laboratorio virtual, por lo cual si el supervisor no está bien desarrollado puede conducir a fallos de aprendizaje.
- Gracias a la evaluación de las tres pruebas experimentales, se descubrió que la implementación del entorno HILS arrojó mejores resultados cuando se hizo de manera previa a la práctica en el proceso o planta real, pues los estudiantes reforzaban sus conocimientos acerca del proceso industrial trabajado.

5.2. Recomendaciones

Para la réplica o la realización de estudios similares en etapas diferentes o más avanzadas, se sugiere:

- Hacer un entorno HILS que implemente en su parte de modelado, una herramienta software que permita obtener un modelo matemático de la planta, comparando los resultados con un simulador de proceso dinámico como el que fue utilizado en este trabajo, con la finalidad de conocer cuál guarda más similitud con la planta real.
- Utilizar los laboratorios virtuales soportados en entornos HILS para prácticas más allá del control de proceso, debido a que estos vinculan diferentes componentes y herramientas del sector industrial es fácil plantear otras temáticas de estudio.
- Diseñar e implementar un entorno HILS con base en un sistema de control distribuido (DCS), que cuente con diversas estaciones y servidores, con el objetivo de entrenar y capacitar a los alumnos para afrontar las condiciones actuales de trabajo en el sector industrial.
- Implementar un entorno HILS que vincule un proceso industrial más complejo, con una mayor cantidad de variables de proceso e instrumentación, de tal manera que soporte la realización de diferentes estrategias de control, además, que posea un factor teórico-práctico más completo que afiance los conocimientos aprendidos en su proceso académico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Dai, P. Zhou, D. Zhao, S. Lu, and T. Chai, "Hardware-in-the-loop simulation platform for supervisory control of mineral grinding process," *Powder Technol.*, vol. 288, pp. 422–434, 2016.
- [2] A. Creus Solé, *Simulación y control de procesos por ordenador*, 2nd ed. 2007.
- [3] M. Iacob and G. Andreescu, "Real-time hardware-in-the-Loop test platform for thermal power plant control systems," in *2011 IEEE 9th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, 2011, pp. 495–500.
- [4] M. Iacob and G. Andreescu, "Implementation of hardware-in-the-Loop system for drum-boiler-turbine decoupled multivariable control," in *2011 6th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, 2011, pp. 45–50.
- [5] E. ZaeV, A. Tuneski, D. Babunski, L. Traijkovski, A. Nospal, and G. Rath, "Hydro power plant governor testing using hardware-in-the-loop simulation," in *2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, 2012, pp. 271–274.
- [6] D. J. Rankin and J. Jiang, "A Hardware-in-the-Loop Simulation Platform for the Verification and Validation of Safety Control Systems," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 58, no. 2, pp. 468–478, 2011.
- [7] F. P. Queiroz, V. A. Gama, F. J. Gomes, and A. A. . Coelho, "Soluções HILS baseadas em FOSS para treinamento y supervisão em controle de processos industriais," in *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications -INDUSCON 2010*, 2010, pp. 1–6.
- [8] J. Machado and E. Seabra, "HiL simulation workbench for testing and validating PLC programs," in *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2013, pp. 230–235.
- [9] Z. Luo, M. Alam, S. H. Hong, Y. Ding, A. Xu, and D. Kwon, "A hardware-in-the-loop simulator for demand response energy management in industrial facilities," in *2015 Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES)*, 2015, pp. 1–6.
- [10] H. S. Khan and M. B. Kadri, "DC motor speed control by embedded PI controller with hardware-in-loop simulation," in *2013 3rd IEEE International Conference on Computer, Control and Communication (IC4)*, 2013, pp. 1–4.
- [11] N.-V. Truong and D.-L. Vu, "Hardware-in-the-Loop approach to the development and validation of precision induction motor servo drive using xPC Target," in *2012 Ninth International Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, 2012, pp. 159–163.
- [12] K. de Vasconcelos Oliveira, A. Perkusich, K. C. Gorgônio, L. Dias da Silva, and A. F. Martins, "Using equivalence classes for testing programs for safety instrumented systems," in *2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, 2013, pp. 1–7.
- [13] I. D. T. De Souza, S. N. Silva, R. M. Teles, and M. A. C. Fernandes, "Platform for Real-Time Simulation of Dynamic Systems and Hardware-in-the-Loop for Control Algorithms," *Sensors (Basel Switzerland)*, vol. 14, no. 10, pp. 19176–19199, 2014.
- [14] A. Keliris, H. Salehghaffari, B. Cairl, P. Krishnamurthy, M. Maniatakos, and F.

- Khorrani, “Machine learning-based defense against process-aware attacks on Industrial Control Systems,” in *2016 IEEE International Test Conference (ITC)*, 2016, pp. 1–10.
- [15] X. Lu, B. Kiumarsi, T. Chai, and F. L. Lewis, “Data-driven optimal control of operational indices for a class of industrial processes,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 10, no. 12, pp. 1348–1356, 2016.
- [16] D. K. . Kufoalor, S. Richter, L. Imsland, T. A. Johansen, M. Morari, and G. O. Eikrem, “Embedded Model Predictive Control on a PLC Using a primal-dual first-order method for a subsea separation process,” in *22nd Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2014, pp. 368–373.
- [17] D. K. M. Kufoalor, B. J. T. Binder, H. J. Ferreau, L. Imsland, T. A. Johansen, and M. Diehl, “Automatic deployment of industrial embedded model predictive control using qpOASES,” in *2015 European Control Conference (ECC)*, 2015, pp. 2601–2608.
- [18] S. Dominic, L. Yannik, A. Schwung, and S. X. Ding, “PLC-Based Real-Time Realization of Flatness-Based Feedforward Control for Industrial Compression Systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 2, pp. 1323–1331, 2016.
- [19] E. Galardi, L. Pugi, N. Lucchesi, A. Rindi, U. Di Firenze, I. Industriale, and V. S. Marta, “Hardware in the loop testing of a steam turbine bypass regulator using a TI C2000 micro-controller,” in *2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC)*, 2014, pp. 255–259.
- [20] J. Senthil Kumar and E. Karthigai Amuta, “Control and tracking of robotic manipulator using PID controller and hardware in Loop Simulation,” in *Control and tracking of robotic manipulator using PID controller and hardware in Loop Simulation*, 2014, pp. 1–3.
- [21] B. Svensson, F. Danielsson, and B. Lennartson, “Time-synchronised hardware-in-the-loop simulation — Applied to sheet-metal press line optimisation,” *Control Eng. Pract.*, vol. 20, no. 8, pp. 792–804, 2012.
- [22] L. F. Rodríguez Ortiz and Y. E. Hurtado Tálaga, “Planta virtual BATCH con integracion empresarial en la categoria administracion de produccion,” Universidad del Cauca, 2012.
- [23] S. Kain, F. Schiller, and S. Dominka, “Reuse of models in the lifecycle of production plants using HiL simulation models for diagnosis,” in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp. 1802–1807.
- [24] L. Ferrarini and A. Dedè, “A Model-Based Approach for Mixed Hardware In the Loop Simulation of Manufacturing Systems,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 43, no. 4, pp. 36–41, 2010.
- [25] F. Fakir, D. Brunini, and E. P. Godoy, “Hardware in the loop simulation for industrial process control.” 2014.
- [26] Q. Meng, H. Liu, S. Zhou, Y. Zhang, C. Liang, B. Yang, and D. Chen, “Hardware-in-the-loop Simulation of Process Control Based on OPC Technology and MATLAB/SIMULINK,” *Adv. Sci. Technol. Lett.*, vol. 53, pp. 49–52, 2014.
- [27] D. H. D’Arthenay Bermúdez, “Desarrollo de un simulador de procesos industriales bajo configuración Hardware-in-the-Loop para la práctica-enseñanza de control lógico y regulatorio mediante un PLC,” Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [28] O. I. Caldas Flautero, S. Jiménez Gómez, E. Mejia Ruda, O. F. Avilés Sánchez, and

- D. Amaya Hurtado, "Control system of a plant embedded in FPGA using Hardware in the loop," *Dyna*, vol. 80, no. 179, pp. 51–59, 2013.
- [29] S. Rock, "Hardware in the loop simulation of production systems dynamics," *Prod. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 329–337, 2011.
- [30] R. Dittmar, *Use of an industrial distributed control system in conjunction with Matlab/Simulink for process control education*, vol. 45, no. 11. IFAC, 2012.
- [31] R. Barrio, J. Parrondo, E. Blanco, J. Fernández, D. De Energía, E. P. I. De Gijón, and U. De Oviedo, "Introducción de laboratorios virtuales en la enseñanza no presencial mediante entornos de trabajo propios," *Rev. Form. e Innovación Educ. Univ.*, vol. 4, no. 1, pp. 55–67, 2011.
- [32] J. A. Rossiter, Y. B. Shokouhi, M. Abdulwahed, and I. Lilley, "Developing web accessible laboratories for introductory systems and control using student projects," in *18th IFAC World Congress*, 2011, vol. 44, no. 1, pp. 7274–7279.
- [33] F. Soares, C. P. Leão, V. Carvalho, R. M. Vasconcelos, and S. Costa, "Automation & Control Remote Laboratory: Evaluating a Cooperative Methodology," in *2012 6th IEEE International Conference on E-Learning in Industrial Electronics (ICELIE)*, 2012, pp. 34–39.
- [34] J. alberto Guzman Luna, I. D. Torres, and M. Lopez Bonilla, "Un caso práctico de aplicación de una metodología para laboratorios virtuales," *Sci. Tech.*, vol. 19, no. 1, pp. 67–76, 2014.
- [35] M. Fernández Fernández, C. Muñoz Polblete, E. Rubio Rodriguez, W. Gutiérrez Marroquin, and L. Benavides Maldonado, "Ventana virtual para macrolaboratorio de automatizacion," in *XXIX Congreso chileno de educacion en ingenieria (UFRO 2016)*, 2016, pp. 1–13.
- [36] C. Infante Jimenez, "Propuesta pedagógica para el uso de laboratorios virtuales como actividad complementaria en las asignaturas teórico-prácticas," *Rev. Mex. Investig. Educ.*, vol. 19, no. 62, pp. 917–937, 2014.
- [37] I. Santana Ching, L. Hernández Santana, M. Ferre Pérez, R. Aracil Santonja, and E. Pinto Bermúdez, "Experiencias del uso de laboratorios remotos en la enseñanza de la automática," *Rev. Electrónica ADA*, vol. 5, no. 4, pp. 320–329, 2011.
- [38] E. Navarro Arévalo and J. M. Tizón Pulido, "Docencia presencial y laboratorio remoto: una unión idónea para las prácticas de motores alternativos," *Model. Sci. Educ. Learn.*, vol. 9, no. 2, pp. 129–138, 2016.
- [39] A. Sharma, M. Jelemenský, R. Valo, M. Kalúz, and M. Fikar, "Process Control Education using a Laboratory Separation Process," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 6, pp. 4–9, 2016.
- [40] M. Kalúz, P. Orduña, J. Garcia-Zubia, M. Fikar, and L. Cirka, "Sharing Control Laboratories by Remote Laboratory Management System," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 46, no. 17, pp. 345–350, 2013.
- [41] M. J. Blas and A. S. Loyarte, "Laboratorio Virtual y Remoto : Uso de la Tecnología de la Información como Ayuda en la Educación," in *XIV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2012)*, 2012, pp. 988–992.
- [42] R. Pastor, D. Sanchez, N. Aliane, R. Hernandez, A. Robles-gómez, A. Caminero, S. Ros, G. Díaz, and M. Castro, "Practical experiences on building structured remote and virtual laboratories from the student's point of view," in *2012 Frontiers in Education Conference Proceedings*, 2012, pp. 1–6.

- [43] J. M. Andújar, A. Mejías, and M. A. Márquez, “Augmented Reality for the Improvement of Remote Laboratories : An Augmented Remote Laboratory,” vol. 54, no. 3, pp. 492–500, 2011.
- [44] M. M. Zuluaga López, “Diseño de un sistema de aprendizaje para un laboratorio remoto usando una metodología de Ingeniería . Un estudio de caso,” Universidad EAFIT, 2011.
- [45] Rockwell Automation, “Red DeviceNet,” 2017. [Online]. Available: <http://ab.rockwellautomation.com/es/Networks-and-Communications/DeviceNet-Network>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [46] Rockwell Automation, “Red DH-485,” 2017. [Online]. Available: <http://ab.rockwellautomation.com/es/Networks-and-Communications/DH-485-Network>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [47] Rockwell Automation, “Red EtherNet/IP,” 2017. [Online]. Available: <http://ab.rockwellautomation.com/es/Networks-and-Communications/Ethernet-IP-Network>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [48] Rockwell Automation, “Sistemas de controlador lógico programable MicroLogix 1100,” 2017. [Online]. Available: <http://ab.rockwellautomation.com/es/Programmable-Controllers/MicroLogix-1100>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [49] Rockwell Automation, “RSLogix 500 Solutions from Rockwell Software,” 2017. [Online]. Available: <http://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/products/rslogix500.page>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [50] Rockwell Automation, “RSView 32 Studio from Rockwell Automation,” 2017. [Online]. Available: <http://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/products/rsvview32.page?> [Accessed: 17-Sep-2017].
- [51] Rockwell Automation, “FactoryTalk View Site Edition Human Machine Interface Software,” 2017. [Online]. Available: <http://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/products/factorytalk-view-se.page?> [Accessed: 17-Sep-2017].
- [52] Rockwell Automation, “RSLogix 5000 Logix Designer,” 2017. [Online]. Available: <http://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/products/studio5000-logix-designer.page>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [53] Kepware, “KEPServerEX Connectivity Platform | OPC Server | Kepware,” 2017. [Online]. Available: <https://www.kepware.com/en-us/products/kepserverex/>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [54] Aurel, “CADSIM Plus – Aurel,” 2017. [Online]. Available: <https://www.aurelsystems.com/cadsim-plus/>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [55] MathWorks, “MATLAB,” 2017. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html#overview>. [Accessed: 17-Sep-2017].
- [56] Amatrol, *Manual de manejo de la planta T5552 Amatrol “Process Control Systems” Lap 1 Introduction to process control. BB270-XDO1AEN*, 1st ed. Jeffersonville, 2014.
- [57] Amatrol, *Installation guide for T5552 - Process Control Learning System. DB270-*

- XE00AEN*, 2nd ed. Jeffersonville, 2014.
- [58] G. V. Quesada, F. Casellas, F. Guinjoan, J. Esteban, H. Martínez, and R. Piqué, “Simulación mediante ‘Hardware In the Loop’ de un Convertidor Buck,” in *21th Annual Seminar on Automation, Industrial Electronics and Instrumentation- SAAEI 2014*, 2014, pp. 25–27.
 - [59] C. Selltiz, L. S. Wrightsman, and S. W. Cook, *Métodos de investigación en las relaciones sociales*, 9th ed. Madrid, 1980.
 - [60] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista lucio, *Metodología de la investigación*, 5th ed. Mexico D.F., 2010.