

**ENFOQUE HARDWARE IN THE LOOP SIMULATION PARA  
PRÁCTICAS EN CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES****FOCUS HARDWARE IN THE LOOP SIMULATION FOR  
PRACTICES IN INDUSTRIAL PROCESS CONTROL**

**Ing. Brenda Natalia Rosero Londoño\***, **Ing. Andrés Felipe Gonzales Ordoñez\***,  
**MSc. Juan Fernando Flórez Marulanda\***

\* **Universidad del Cauca**, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones,  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control.  
Calle 5 N° 4-70, Popayán, Cauca, Colombia.  
+57 (2) 8209900.  
E-mail: {brendarosero, afgonzalezor, jfllorez}@unicauca.edu.co.

**Resumen:** Se presenta un enfoque de ejecución para prácticas de laboratorio en control de procesos industriales en dos fases: una planta virtual usando un entorno Hardware in the Loop Simulation y la planta real. Para el diseño del entorno, se aplica un método de cinco etapas: selección de planta, definición de requisitos, selección, implementación y evaluación de la planta virtual. Se evalúa en una planta de nivel-flujo Amatrol, diseñando tres prácticas realizadas en el entorno real, virtual y en ambos; evaluando las temáticas de diagramas de la planta, instrumentación, lógica de control, válvula de control y comunicaciones. Se logró un 77,90% de aciertos en la prueba realizada con el enfoque propuesto, con un margen del 10% en relación a las prácticas individuales.

**Palabras clave:** Hardware in the Loop, Simulación de sistemas, Control de procesos industriales, Herramientas interactivas, laboratorios virtuales y remotos.

**Abstract:** An approach of laboratory practices in control of industrial processes with two phases is presented: a virtual plant using Hardware in the Loop Simulation environment and the real plant. For the designing of the environment, a five-stage method is applied: plant selection, definition of requirements, selection, implementation and evaluation of the virtual plant. It is evaluated in an Amatrol level-flow plant, designing three practices realized on the real environment, the virtual one and both; evaluating the degrees of plant diagrams, instrumentation, control logic, control valve and communications. A score of 77.90% was achieved in the test conducted with the proposed approach, with a margin 10% in relation to individual practices.

**Keywords:** Hardware in the Loop, Systems simulation, Control of industrial processes, Interactive tools, virtual and remote laboratories.

## 1. INTRODUCCIÓN

El área de control de procesos industriales ha presentado una constante evolución, este se ha impulsado por el desarrollo de la computación, logrando simular procesos cercanos a la realidad, recreando distintas situaciones y elementos, conduciendo a crear laboratorios virtuales para el control de procesos industriales con diferentes herramientas computacionales, alcanzando una

ventaja comparativa respecto a los laboratorios reales, en factores como: eficiencia, flexibilidad, mantenimiento, costos y restricciones físicas (Brinson, 2015).

Una técnica que permite obtener resultados de control en simulación satisfactorios, se denomina Hardware in the Loop Simulation (HIL) (Patil & Bhosale, 2015). Siendo el puente entre la simulación y emulación gracias a la vinculación de

componentes reales y simulados (Gu et al., 2007). Con HIL se evalúa nuevos desarrollos en control en diferentes campos de conocimiento como:

--Robótica: en (Chhabra & Emami, 2013) un diseño concurrente holístico enfocado a robots utilizando HIL y en (Senthil Kumar & Karthigai Amuta, 2014) se diseñó un controlador PID para corregir el error entre una variable de proceso medida, y un punto de consigna deseado para un manipulador robótico.

--Sector automotriz: en (Iqbal & Swetha, 2014) se configura un entorno HIL para desarrollar y ejecutar pruebas funcionales sobre dispositivos ECU (unidades de control electrónico), en (Short & Pont, 2008) con una plataforma HIL se evalúa la alta integridad de los sistemas de control de automóviles y en (Svensson et al., 2012) se implementó una línea de prensa y chapado automotriz por simulación HIL.

--Sector aeroespacial: en (Leitner, 1996) se desarrolló un laboratorio para evaluar e integrar subsistemas de una nave espacial mediante el uso de HIL y en (Piedbœuf et al., 2001) se realiza el diseño y desarrollo de un banco de pruebas para el manipulador diestro de propósito especial de la Estación Espacial Internacional, mediante su emulación de HIL.

--Procesos industriales: en el sector industrial la utilización de HIL tiene beneficios como: entrenamiento de operarios, aprendizaje sobre modelado y control de procesos industriales, simulación de nuevas líneas de producción y de condiciones anormales de una planta, entre otros (Queiroz et al., 2010).

Existen diversos trabajos en los que se utilizan diferentes plataformas y estrategias para implementar HIL, sin embargo, pocos están relacionados con el control de procesos industriales (Caldas Flautero et al, 2013;, 2012; Kim et al, 2013; Park & Chang, 2012; Queiroz et al., 2010; Rock, 2011), donde usan plataformas variopintas. Por lo que, en este trabajo se articulan dos aspectos, el primero un método de implementación de entornos HIL para prácticas de laboratorio; con un enfoque de ejecución de prácticas de lo virtual a lo real. Mediante un laboratorio virtual de una planta real basado en un entorno HIL, como paso previo a las prácticas convencionales. Se utiliza como caso de estudio una planta del Laboratorio de Control de Procesos (LCP) de la Universidad del Cauca, sobre la cual se realizan las diferentes pruebas que permiten corroborar los resultados del método y el uso del entorno HIL.

En las siguientes secciones, se describe la propuesta del método, el diseño e implementación del laboratorio virtual soportado en un entorno HIL

para un caso de estudio y al final, se presentan los resultados obtenidos y se plantean las conclusiones correspondientes.

## 2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

### 2.1. Método propuesto

Se propone un método para la creación de un laboratorio virtual (LV) soportado en un entorno HIL vinculado como paso previo a la interacción con la planta real. Para el desarrollo del LV se plantean las siguientes etapas:

1. *Selección de la planta a utilizar:* se elige la planta objeto de estudio.
2. *Definición de requisitos del entorno HIL:* se especifican las funcionalidades que el entorno HIL debe cumplir de acuerdo a las necesidades del usuario, identificando de forma clara el funcionamiento que tendrá al ser desarrollado como un LV.
3. *Selección del entorno HIL:* se determinan las posibles opciones de entornos HIL a utilizar en el LV, se hace uso de la técnica revisión sistemática (Petersen et al., 2008) que permite construir un esquema de clasificación y obtener una visión general de un área de investigación y mediante diferentes criterios se escoge el entorno HIL que cumple con las funcionalidades previamente establecidas.
4. *Implementación del entorno HIL:* se desarrolla el entorno HIL, se expone su arquitectura, su construcción, su prueba preliminar y ajustes.
5. *Evaluación del entorno HIL:* se evalúa el LV soportado en HIL, mediante una prueba basada en una práctica con estudiantes y su posterior validación mediante un examen de conocimientos.

Cada una de las etapas del método propuesto, conlleva una serie de actividades necesarias para su desarrollo (Tabla 1).

*Tabla 1: Etapas y actividades método propuesto de creación Lab. Virtual HIL*

Etapa	Actividad
Selección de la planta a utilizar	Realizar diagnóstico sobre plantas a utilizar
Definición requisitos entorno HIL	Seleccionar planta a utilizar para el LV. Hacer estudio sobre requisitos a cumplir con el LV
Selección del entorno HIL	Especificar requisitos del LV Aplicar revisión sistemática para descubrir entornos a aplicar en el LV Definir criterios de selección para el entorno Elección del entorno a implementar en el LV
Implementación	Diseño preliminar del entorno

del entorno HIL

Diseño del modelo de la planta a utilizar  
Configurar la comunicación del entorno  
Configurar la lógica de control del entorno  
Crear las pantallas de supervisión del proceso  
Interconectar los componentes del entorno  
Evaluar preliminarmente el LV  
Refinar el LV  
Evaluación del entorno HIL Selección una muestra para la prueba de evaluación  
Realizar la prueba y evaluar la muestra.

Se aplica el método al LCP del Programa de Ingeniería en Automática Industrial (PIAI) de la Universidad del Cauca.

### 2.1.1. Selección de la planta a utilizar:

Para esto se realizan las siguientes actividades:

1. Diagnóstico sobre las actuales plantas del LCP, este cuenta con seis plantas de experimentación; se diseña y registra una ficha técnica con sus respectivos datos: proceso, variable manipulada, controlada y de disturbio; esquema de control, instrumentación, plataformas software, guías de laboratorio, problemáticas y cursos del PIAI que las utilizan.
2. Elección de la planta de estudio en mejores condiciones, tanto hardware como software, para esto se realiza una encuesta a estudiantes, laboratorista y profesores del curso LCP; escogiendo el sistema de control de procesos Amatrol T5552 de nivel-flujo.

La planta Amatrol T5552 (Fig. 1), 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 tanque de proceso, de compartimento dual, bajo el impulso de una motobomba. El líquido retorna al tanque de almacenamiento por acción de la gravedad.

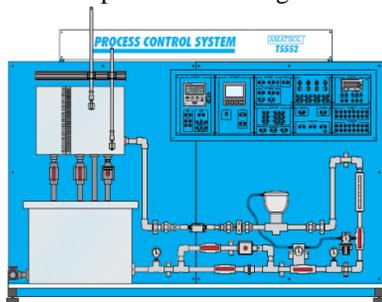


Fig. 1. Sistema de control de procesos Amatrol T5552 (tomado de (Amatrol, 2014))

### 2.1.2. Definición requisitos del entorno HIL

De acuerdo a las limitaciones o características del LCP del PIAI, se definen las funciones que el entorno HIL estará en capacidad de cumplir:

- ✓ Experimentación en proyectos de automatización.
- ✓ Utilización para proyectos en los que se trabaja de manera individual.
- ✓ Desarrollo enfocado para la enseñanza.
- ✓ Funcionamiento en tiempo real, trabajando bajo el sub-modo Soft Real-Time (Iacob & Andreescu, 2011).

### 2.1.3. Selección del entorno HIL

Para la selección del entorno HIL se realizan las siguientes actividades:

1. Realizar una revisión sistemática (Petersen et al., 2008) para clasificar la información, facilitando la selección de los potenciales entornos HIL utilizados para implementar procesos industriales. Se hace énfasis en las herramientas software y procesos industriales utilizados. A la fecha se dispone de 19 reportes de desarrollo software con procesos industriales pertinentes para el proyecto (Dai et al., 2016; De Souza et al., 2014; de Vasconcelos Oliveira et al., 2013; Dominic et al., 2016; Galardi et al., 2014; Iacob & Andreescu, 2011; Keliris et al., 2016; Khan & Kadri, 2013; Kufalor et al., 2014, 2015; Luo et al., 2015; Machado & Seabra, 2013; Queiroz et al., 2010; Rankin & Jiang, 2011; Senthil Kumar et al., 2014; Svensson et al., 2012; Truong & Vu, 2012; Zhev et al., 2012).
2. Definir criterios de evaluación para seleccionar el entorno HIL reportado que cumpla con los requisitos previamente establecidos, teniendo en cuenta las observaciones de los profesores del PIAI, los recursos disponibles en el LCP, grado de dificultad de la implementación de entornos HIL, el tipo de proceso y la planta seleccionada. Dichos criterios son: modelado matemático para la planta, operación en tiempo real, utilización de recursos del PIAI, representación matemática y gráfica de los instrumentos.
3. Evaluar los entornos reportados respecto a los criterios establecidos; el entorno HIL mejor evaluado pertenece al trabajo “Planta virtual batch con integración empresarial en la categoría administración de producción” (Rodríguez Ortiz & Hurtado Tálaga, 2012). Este obedece a una estructura donde la planta simulada, la supervisión, la edición de la lógica de control y las comunicaciones se encuentran en un mismo computador, este se

comunica a través de una red Ethernet con un controlador lógico programable (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 (Fig. 2).



Fig. 2. Estructura del Entorno HIL seleccionado

2.1.4. Implementación del entorno HIL

El procedimiento está dividido en siete actividades que permiten el diseño de la planta virtual, la interconexión entre los componentes hardware y herramientas software, el control del proceso y la supervisión (tabla 1).

a) Diseño preliminar de características del entorno HIL:

Se plantea una idea inicial de los circuitos de recorrido de la planta y de las pantallas de supervisión, a partir de estos diseños previos se planean diferentes características.

--Circuitos de recorrido de la planta virtual: se formuló el funcionamiento de la planta virtual a partir de tres circuitos de recorrido para el líquido de la planta Amatrol. El circuito principal se realiza por el tramo A y tramo B; el circuito secundario comprende los tramos A y C y el circuito total comprende los tramos A, B y C, (Fig. 3).

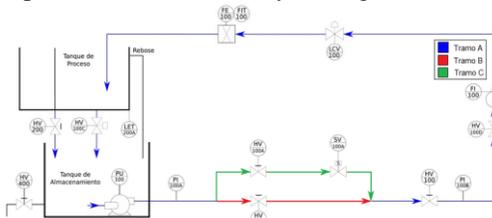


Fig. 3. Circuitos de recorrido del fluido

A los circuitos identificados se le vincula el conjunto de válvulas de flujo. A cada grupo de válvulas se le asocia su respectiva etiqueta (tag) para seleccionar el circuito a trabajar desde la supervisión del LV (Tabla 2).

Tabla 2: Tags y válvulas asociadas a los circuitos

Circuito	Tag	Válvulas a abrir
Principal	Circuito_1	HV100B - FV100 - HV100D - FCV100 -

Secundario	Circuito_2	HV100C - HV100A - SV100A - FV100 - HV100D - FCV100 - HV100C
Total	Circuito_3	HV100A- HV100B - SV100A- FV100 - HV100D - FCV100 - HV100C

--Interfaz Hombre Máquina del LV: se realizó un primer diseño visual de la interfaz hombre máquina (HMI) para la supervisión de la planta virtual, con dos pantallas, una para el proceso y otra para el monitoreo gráfico de las variables.

✓ Pantalla principal: Representación gráfica más fiel posible a la planta Amatrol, con recuadros de parámetros para ingresar y visualizar datos como valor deseado, variable del proceso, parámetros del control PID, apertura de válvulas.

✓ Pantalla de graficas: Permite monitorear las variables más importantes del proceso (nivel, flujo, esfuerzo de control) y configurar acciones de control como: ajustar las constantes del PID, cambiar el valor deseado, variar el porcentaje de apertura de las válvulas y seleccionar el circuito a recorrer.

b) Diseño del modelo de la planta virtual:

Desarrollado en el software CADSIM Plus, el cual permite realizar modelos gráficos, de acuerdo al siguiente procedimiento:

- 1) Seleccionar los componentes que componen la planta desde una librería de partes disponibles (actuadores, sensores, tubería, etc.).
- 2) Definir las variables del proceso (nivel, flujo y presión).
- 3) Ingresar los parámetros para: tuberías, equipos e instrumentos, logrando que el modelo de la planta virtual sea lo más similar posible a la planta real, a partir de la extracción de los valores de los parámetros directamente de la planta física y su documentación.
- 4) Especificar el recorrido de las variables en el lazo del proceso modelado en CADSIM Plus (Fig. 4).

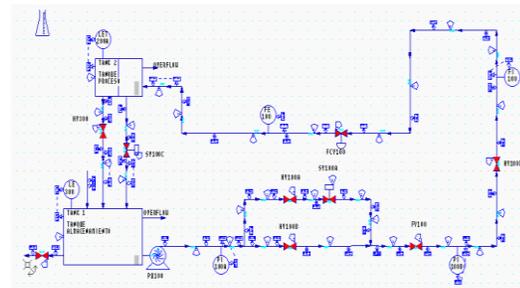


Fig. 4. Modelo planta virtual en CADSIM Plus del LV.

c) *Configuración de la Comunicación Ethernet*

Esta se realiza en la herramienta RSLinx Classic, mediante los siguientes pasos:

- 1) Realizar la conexión física del PLC y el computador a la red institucional de la entidad a través de un cable de red.
- 2) Configurar la red a través de RSLinx Classic, crear un manejador (driver) para la comunicación Ethernet y vincular el PLC a la red a través de su módulo Ethernet 1756-ENBT.

d) *Edición de la lógica de control*

Para programar el PLC se usó la aplicación RSLogix 5000, donde se implementó la lógica de control a partir de lenguaje de escalera, para ello se debe:

- 1) Crear un nuevo proyecto en RSLogix 5000.
- 2) Generar las tags asociadas a la instrumentación, controlador y botones del supervisorio, apoyándose en el diseño preliminar (sección a).
- 3) Diseñar el código que implementa la lógica de control.
- 4) Descargar la lógica de control al PLC.

e) *Configuración del servidor OPC*

Esto se hace mediante KEPServerEX, realizando los siguientes pasos:

- 1) Crear un nuevo proyecto en KEPServerEX.
- 2) Seleccionar el driver del componente a conectar (PLC ControlLogix Ethernet).
- 3) Seleccionar el adaptador de red (computador host), identificado con la IP del computador que está conectado a la red.
- 4) Seleccionar el modelo del dispositivo PLC a vincular a la red Ethernet (ControlLogix 5500).
- 5) Escoger el dispositivo a través del cual el PLC se conectará con KEPServerEX (módulo Ethernet PLC), de esta forma se crea el proyecto asociado al PLC.
- 6) Exportar las tags del código de control al servidor OPC.

f) *Conexión entre el Servidor OPC y el modelo de la planta virtual*

En este paso se vinculan las tags del PLC con las del modelo de la planta virtual, a través del servidor OPC (KEPServerEX) y CADSIM Plus, para ello se realizan las siguientes acciones:

- 1) Formar en CADSIM Plus un acceso a datos OPC.

- 2) Vincular las tags extraídas de KEPServerEX con las de los equipos e instrumentos de la planta virtual.
- 3) Conectar gráficamente las tags del modelo con el acceso a datos OPC.

De esta forma queda el modelo de la planta asociado con el servidor OPC, listo para enviar y recibir datos desde el PLC y las diferentes herramientas software del entorno (Fig. 5).

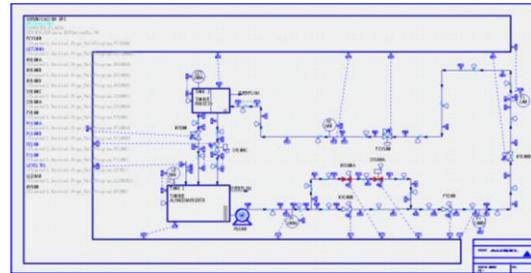


Fig. 5. Modelo planta virtual asociado al servidor OPC en CADSIM Plus

g) *Creación del supervisorio del LV*

La supervisión de la planta virtual se realiza en FactoryTalk View, realizando los siguientes pasos:

- 1) Crear un nuevo proyecto para una estación local en FactoryTalk View.
- 2) Configurar la conexión del servidor OPC para la transferencia de datos hacia el supervisorio.
- 3) Crear las pantallas para la interfaz gráfica con base en el diseño preliminar.
- 4) Vincular las tags del PLC con los elementos gráficos del supervisorio.
- 5) Crear el ejecutable de la aplicación que será utilizado por los usuarios finales.

A continuación, se detallan las pantallas creadas:

- ✓ Pantalla principal: es la representación gráfica del proceso, incorporando elementos como tanques, indicadores, válvulas, sensores y actuadores que conforman el lazo de control de nivel, también cuenta con un recuadro que agrupa las configuraciones para los instrumentos y la lógica de control, cuenta con dos barras en la parte inferior que permiten la navegación entre pantallas y la elección del circuito de recorrido (Fig. 8).

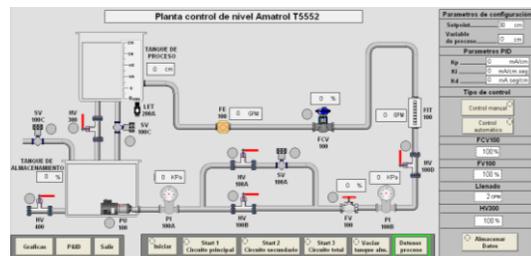


Fig. 8. Pantalla principal del supervisorio del LV.

- ✓ Pantalla de gráficas: está dividida en dos gráficas de tendencias, la primera para el monitoreo del valor deseado y el nivel en el tanque de proceso; y la segunda para el esfuerzo de control de la válvula de control y el flujo de líquido a su salida. Hay tres recuadros para la navegación entre pantallas, elección del circuito de recorrido; la configuración de algunos instrumentos y la lógica de control.
- ✓ Pantalla diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID): esta pantalla adicional hace una descripción de la planta, los circuitos de recorrido del fluido e instrumentos.

#### h) *Evaluar preliminarmente el LV*

Para comprobar el adecuado funcionamiento del LV, se realizó una prueba para recibir realimentación y solucionar problemas. Esta prueba de refinamiento fue fundamentada en una práctica de laboratorio con su respectiva guía, en la cual se realizó el control de nivel de la planta virtual, se hizo con seis estudiantes de último semestre del PIAI, al final de la práctica se registraron sus opiniones y observaciones; a partir de estas se hicieron mejoras en diferentes aspectos obteniendo la versión final del LV.

#### 2.1.5. *Evaluación del entorno HIL*

Este se hace mediante tres pruebas basadas en tres variantes de una misma práctica: diseño de un controlador PID, para el control de nivel. Al finalizar cada prueba los estudiantes presentan un examen de conocimientos de las temáticas experimentadas. A continuación, se presentan los pasos realizados:

##### 1. Seleccionar la muestra para las pruebas

Se conformó la población con 30 alumnos del PIAI que estuviesen cursando el LCP, ya que el LV está enfocado a este curso; se dividieron en 3 grupos de 10 estudiantes para las pruebas.

##### 2. Implementar la evaluación

Se propone realizar tres prácticas de laboratorio y su posterior evaluación, la práctica A se realiza en la planta virtual soportada en el entorno HIL; práctica B, en la planta Amatrol; práctica C, en la planta virtual y luego en la planta Amatrol. Las temáticas del examen de conocimiento son:

- ✓ Diagramas de la planta: dos preguntas respecto a los PFD (diagrama de flujo de proceso) y P&ID de la planta objeto de estudio.

- ✓ Instrumentación: siete preguntas respecto a las variables del proceso, el esquema de control, la acción de control, la clasificación del sistema y disturbios.
- ✓ Lógica de control: cuatro preguntas sobre esquemas de control, acciones de control y respuesta del sistema.
- ✓ Válvula de control: tres preguntas relacionadas al elemento final de control, como: su clase, tipo de accionamiento y tipo de válvula.
- ✓ Comunicaciones: se interrogó sobre las redes, estándares y arquitecturas que permitieron la comunicación, en la práctica A y C se hicieron tres preguntas y dos para la práctica B.

Se presenta una ficha resumen de las pruebas de evaluación (Tabla 3).

*Tabla 3: Formato de la evaluación de las tres pruebas.*

Práctica A	Práctica B	Práctica C
10 estudiantes	10 estudiantes	10 estudiantes
Planta virtual	Planta Amatrol	Plantas Virtual-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, 56 min práctica, 14 min prueba

La evaluación se realizó en dos sesiones; la primera con 16 estudiantes, con ellos se hicieron dos pruebas, 8 realizaron la práctica A de la planta virtual y los otros 8 realizaron la B de la planta Amatrol, la segunda sesión se realizó con 14 estudiantes, 10 hicieron la práctica C, 2 realizaron la A y los otros 2 realizaron la B.

### 3. ANALISIS Y RESULTADOS

Los resultados en el examen de conocimientos en cada prueba, se presentan por: temática, individual y general. Se muestra el porcentaje de respuestas correctas (0-100%), se definen como resultados excelentes los comprendidos en un rango de 80-100%, aceptables entre 60-80% y deficientes para menores de 60%.

Se presentan los resultados por temática para cada práctica (Fig. 9); de forma individual para los diez estudiantes de cada práctica (Fig. 10) y por último los resultados de forma general para los grupos de diez estudiantes que componen cada una de las tres prácticas (Fig. 11).

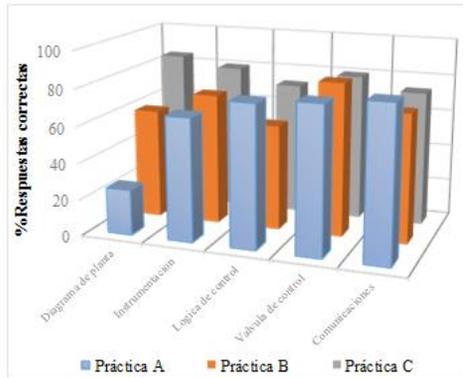


Fig. 9. Resultados por temática para cada práctica.

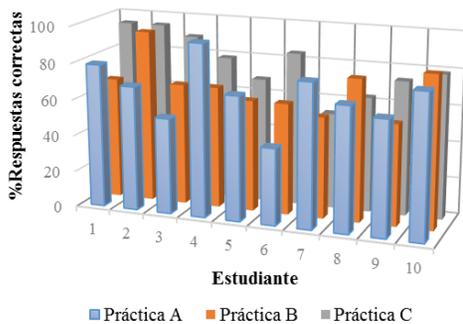


Fig. 10. Resultados de forma individual para cada práctica.

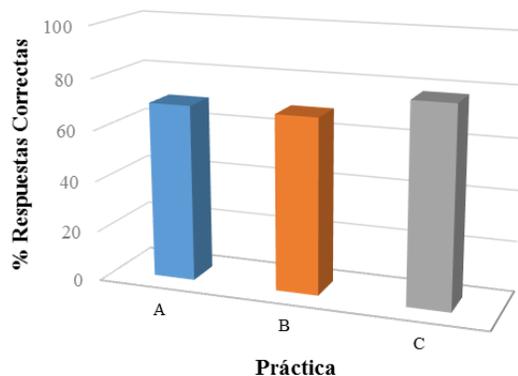


Fig. 11. Resultados de forma general para cada práctica.

### 3.1. Análisis de resultados por temática

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

#### a) Diagramas de la planta

Los porcentajes generales para cada prueba fueron: 25% para la Práctica A, 60% para la B y 85% para la C, la diferencia de los resultados en esta sección estuvo bien marcada, siendo la prueba que unía ambas plantas la que obtuvo mejores resultados

con un 60% y 25% de superioridad respecto a las otras.

#### b) Instrumentación

En esta temática las diferencias no fueron tan marcadas, aunque de nuevo la prueba que obtuvo los mejores resultados con respecto a las demás fue la práctica C. Los porcentajes promedios de cada prueba fueron: 67.15% para práctica A, 71.15% para la B y 80% para la C

#### c) Lógica de control

Los porcentajes generales para cada prueba fueron: 77.5% práctica A, 57.5% para la B y 72.5% para la C, no es factible aseverar que haya mayor apropiación de conocimiento entre la práctica A y C porque su margen de diferencia es poco significativo, pero una posible causa de la diferencia entre las prácticas A y C respecto a la B es el mayor grado de detalle que presentaba la interfaz gráfica de supervisión.

#### d) Válvula de control

Los porcentajes generales para cada prueba fueron: 80% práctica A, 83.35% para la B y 80% para la C, las tres pruebas tuvieron resultados aproximados al 80% de respuestas correctas, sobresaliendo la práctica B por un 3.35%; se destacó esta temática como la más sólida en cuanto a resultados, concluyendo que los estudiantes asimilaron muy bien este instrumento tanto de forma teórica como práctica, indiferente del tipo de planta.

#### e) Comunicaciones

Los porcentajes generales para cada prueba fueron: 83.35% práctica A, 70% para la B y 73.35% para la C, de forma general los estudiantes entendieron en buena medida la comunicación y flujo de datos en el proceso estudiado. Debido a que en el Práctica A se tenía un mayor contacto con las herramientas de comunicación, fue el de mejor resultados.

### 3.2. Análisis de resultados individuales

De forma individual la práctica que obtuvo mejores resultados fue la práctica C, en la cual el resultado más bajo fue de 52,63%, cinco estudiantes estuvieron entre 60-80% y cuatro estuvieron entre 80-100%, dado que el 90% de la población tuvo un desempeño entre aceptable y excelente se considera que los resultados fueron buenos; en segundo lugar se encuentra la práctica B, en esta dos estudiantes comparten el resultado más bajo con 55,56%, seis estudiantes tuvieron resultados entre 60-80% y dos entre 80%-100%, debido a que el 20% de los estudiantes estuvieron por debajo del rango esperado se considera este como un resultado aceptable; por último se encuentra la práctica A, en

el cual hubo dos estudiantes con resultado menores al 60%, uno de ellos con el resultado más bajo de todas las pruebas 42,11% y el otro con 52,63%, siete estudiantes estuvieron entre 60%-80% y uno estuvo entre 80-100%, ya que el 90% de los estudiantes tuvieron resultados deficientes y aceptables no es un buen resultado.

### 3.3. Análisis de resultados generales

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 práctica C obtuvo un 77,90% siendo el mejor promedio, seguido por el grupo de la práctica A que obtuvo 69,48% y por último la práctica B con un 68,89%.

Entre los grupos que realizaron la práctica A y B se diferenciaron apenas por un 0,59%, valor demasiado pequeño que no permite concluir una superioridad de uno con el otro, pero que si evidencia su similitud en la apropiación de conocimientos por los estudiantes. Por otro lado, se evidencia la eficacia y superioridad de desarrollar una misma práctica primero en una planta virtual y seguidamente en una planta real, dándoles la oportunidad a los estudiantes de reforzar sus conocimientos y entender mejor el proceso expuesto en la práctica.

## 4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un entorno HIL, con el fin de atender diferentes problemáticas percibidas de las prácticas de laboratorio convencionales: débil apropiación de conceptos teóricos, daños en equipos e instrumentos, mayor mantenimiento y/o accidentes por el limitado tiempo e inadecuada interacción del estudiante con la planta y equipos industriales antes de contar con una experiencia previa virtual.

Se observó que al realizar prácticas solamente en un laboratorio virtual, soportado en un entorno HIL, podrían obtenerse aproximadamente los mismos resultados que en un laboratorio con una planta real como se evidencia en las prácticas A y B a un costo mucho menor para la institución educativa, aunque este hecho no es garantía para aseverar que los resultados obtenidos por los estudiantes en estas condiciones van a ser óptimos; por otra parte de forma global en este estudio se evidenció que cuando el estudiante tiene una mayor interacción con el proceso se presenta una mayor apropiación y refuerzo de los conocimientos experimentados, en este caso la Práctica C, que

permitía la interacción primero con la planta Virtual y luego la Amatrol, presentó los mejores resultados en las temáticas de diagramas de planta e instrumentación y presentando resultados con valores aceptables y excelentes en un rango de 60-100% en las demás temáticas; también se concibe como amplio dominador de manera individual y general donde se destacan sus mejores resultados de forma homogénea.

## RECONOCIMIENTO

Se agradece a la Universidad del Cauca por la colaboración y el apoyo en el desarrollo del proyecto, facilitando los recursos que permitieron la culminación de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Amatrol. (2014). *Installation guide for T5552 - Process Control Learning System. DB270-XE00AEN* (2nd ed.). Jeffersonville.
- Brinson, J. R. (2015). Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: A review of the empirical research. *Computers & Education*, 87, 218–237.
- Caldas Flautero, O. I., Jiménez Gómez, S., Mejia Ruda, E., Avilés Sánchez, O. F., & Amaya Hurtado, D. (2013). Control system of a plant embedded in FPGA using Hardware in the loop. *Dyna*, 80(179), 51–59.
- Chhabra, R., & Emami, M. R. (2013). A holistic concurrent design approach to robotics using hardware-in-the-loop simulation. *Mechatronics*, 23(3), 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.01.010>
- Dai, W., Zhou, P., Zhao, D., Lu, S., & Chai, T. (2016). Hardware-in-the-loop simulation platform for supervisory control of mineral grinding process. *Powder Technology*, 288, 422–434. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.032>
- De Souza, I. D. T., Silva, S. N., Teles, R. M., & Fernandes, M. A. C. (2014). Platform for Real-Time Simulation of Dynamic Systems and Hardware-in-the-Loop for Control Algorithms. *Sensors (Basel Switzerland)*, 14(10), 19176–19199. <https://doi.org/10.3390/s141019176>
- de Vasconcelos Oliveira, K., Perkusich, A., Gorgônio, K. C., Dias da Silva, L., & Martins, A. F. (2013). Using equivalence

- classes for testing programs for safety instrumented systems. In *2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)* (pp. 1–7). Cagliari.
- Dominic, S., Yannik, L., Schwung, A., & Ding, S. X. (2016). PLC-Based Real-Time Realization of Flatness-Based Feedforward Control for Industrial Compression Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *64*(2), 1323–1331. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2612160>
- Galardi, E., Pugi, L., Lucchesi, N., Rindi, A., Firenze, U. Di, Industriale, I., & Marta, V. S. (2014). 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)* (pp. 255–259). Milano.
- Gu, F., Harrison, W. S., Tilbury, D. M., & Yuan, C. (2007). Hardware-in-the-loop for manufacturing automation control: Current status and identified needs. *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, IEEE CASE 2007*, 1105–1110. <https://doi.org/10.1109/COASE.2007.4341787>
- Harrison, W. S., Tilbury, D. M., & Yuan, C. (2011). From hardware-in-the-loop to hybrid process simulation: An ontology for the implementation phase of a manufacturing system. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *9*(1), 96–109.
- Harrison, W. S., Tilbury, D. M., & Yuan, C. (2012). From Hardware-in-the-Loop to Hybrid Process Simulation: An Ontology for the Implementation Phase of a Manufacturing System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *9*(1), 96–109.
- Iacob, M., & Andreescu, G. (2011). 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* (pp. 495–500). Subotica.
- Iqbal, A., & Swetha, G. (2014). Hardware in Loop Simulation ECU Testing In Automotive. In *International Conference on Recent Advances in Communication, VLSI & Embedded Systems* (pp. 33–36). Warangal.
- Keliris, A., Salehghaffari, H., Cairl, B., Krishnamurthy, P., Maniatakos, M., & Khorrami, F. (2016). Machine learning-based defense against process-aware attacks on Industrial Control Systems. In *2016 IEEE International Test Conference (ITC)* (pp. 1–10). Fort Worth, TX.
- Khan, H. S., & Kadri, M. B. (2013). 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)* (pp. 1–4). Karachi.
- Kim, M., Kang, S., Kim, W.-T., & Chun, I.-G. (2013). Human-Interactive Hardware-In-the-Loop Simulation Framework for Cyber-Physical Systems. In *Second International Conference on Informatics & Applications (ICIA)* (pp. 198–202).
- Kufoalor, D. K. ., Richter, S., Imsland, L., Johansen, T. A., Morari, M., & Eikrem, G. O. (2014). 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* (pp. 368–373). Palermo.
- Kufoalor, D. K. M., Binder, B. J. T., Ferreau, H. J., Imsland, L., Johansen, T. A., & Diehl, M. (2015). Automatic deployment of industrial embedded model predictive control using qpOASES. In *2015 European Control Conference (ECC)* (pp. 2601–2608). Linz.
- Leitner, J. (1996). Space technology transition using hardware in the loop simulation. *1996 IEEE Aerospace Applications Conference. Proceedings*, *2*, 303–311. <https://doi.org/10.1109/AERO.1996.495985>
- Luo, Z., Alam, M., Hong, S. H., Ding, Y., Xu, A., & Kwon, D. (2015). 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)* (pp. 1–6). Seattle.
- Machado, J., & Seabra, E. (2013). HiL simulation workbench for testing and validating PLC programs. In *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 230–235). Bochum.
- Park, S. C., & Chang, M. (2012). Hardware-in-the-loop simulation for a production system. *International Journal of Production Research*, *50*(8), 2321–2330. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.575097>
- Patil, P., & Bhosale, S. (2015). Review on Hardware-in-Loop simulation used to advance design efficiency and test

- competency. *Int. J. Sci. Res.(IJSR)*, 4(3), 2466–2468.
- Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S., & Mattsson, M. (2008). Systematic Mapping Studies in Software Engineering. *12Th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, 17, 10.  
<https://doi.org/10.1142/S0218194007003112>
- Piedbœuf, J.-C., Aghili, F., Doyon, M., Gonthier, Y., Martin, E., & Zhu, W.-H. (2001). Emulation of Space Robot Through Hardware-in-the-Loop Simulation. In *6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS 2001*.
- Queiroz, F. P., Gama, V. A., Gomes, F. J., & Coelho, A. A. . (2010). 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* (pp. 1–6). Sao Paulo.
- Rankin, D. J., & Jiang, J. (2011). A Hardware-in-the-Loop Simulation Platform for the Verification and Validation of Safety Control Systems. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58(2), 468–478.
- Rock, S. (2011). Hardware in the loop simulation of production systems dynamics. *Production Engineering*, 5(3), 329–337.  
<https://doi.org/10.1007/s11740-011-0302-5>
- Rodríguez Ortiz, L. F., & Hurtado Tálaga, Y. E. (2012). *Planta virtual BATCH con integracion empresarial en la categoria administracion de produccion*. Universidad del Cauca.
- Senthil Kumar, J., & Karthigai Amuta, E. (2014). 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* (pp. 1–3). Sirvakasi.
- Short, M., & Pont, M. J. (2008). Assessment of high-integrity embedded automotive control systems using hardware in the loop simulation. *Journal of Systems and Software*, 81(7), 1163–1183.  
<https://doi.org/10.1016/j.jss.2007.08.026>
- Svensson, B., Danielsson, F., & Lennartson, B. (2012). Time-synchronised hardware-in-the-loop simulation — Applied to sheet-metal press line optimisation. *Control Engineering Practice*, 20(8), 792–804.  
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.03.019>
- Truong, N.-V., & Vu, D.-L. (2012). 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)* (pp. 159–163). Bangkok.
- Zaev, E., Tuneski, A., Babunski, D., Trajtkovski, L., Nospal, A., & Rath, G. (2012). Hydro power plant governor testing using hardware-in-the-loop simulation. In *2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)* (pp. 271–274). Bar.