



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN
DE INGENIEROS EN LA
ERA DIGITAL



PRÁCTICA DE LABORATORIO DE CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS ENMARCADO EN INDUSTRIA 4.0

Hader Alberto Madera, Juan David Contreras, Estefany Rey Becerra

**Pontificia Universidad Javeriana
Cali, Colombia**

Resumen

El Control Estadístico de Procesos (CEP), identifica y soluciona problemas enfocados al mejoramiento continuo, por medio de diferentes técnicas. Una de ellas es el gráfico o cuadro de control (CC) que se usa para monitorear una característica de un producto medido de una muestra a través del tiempo. Una metodología didáctica para que los estudiantes aprendan a utilizar los CC es la práctica de laboratorio. Es frecuente que estas estén limitadas al análisis de piezas prefabricadas, lo que no permite representar las situaciones típicas que afrontarán los futuros ingenieros en los diferentes procesos de manufactura reales.

Por esta razón, se desarrolló una práctica para el curso de CEP del programa de Ingeniería Industrial de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, en el Centro de Automatización de Procesos. El objetivo fue involucrar a los estudiantes en un ambiente industrial integrado con la Industria 4.0. Para ello, se usó una Celda de Manufactura Flexible compuesta por máquinas CNC, brazos robóticos y un sistema de almacenamiento automático, los cuales fueron controlados, integrados y supervisados por medio de un sistema de información y comunicación. Con esto, se emuló el ambiente integrando procesos de abastecimiento, transporte, manufactura, ensamble, almacenamiento y supervisión.

Esta práctica se ha realizado desde el segundo semestre de 2018 y se ha evaluado con los resultados de estudiante ABET. Al final de la práctica, los estudiantes desarrollarán la habilidad para conducir experimentos y analizar datos, trabajar en equipo y tener una efectiva comunicación al presentar un informe escrito.

Palabras clave: control estadístico de procesos; industria 4.0; gráficos de control

Abstract

Statistical Process Control (SPC) is a group of techniques for quality control and improvement. One of them is Control Charts (CC) for process monitoring. It is frequent that lab assignment are limited to the analysis of prefabricated parts. This didactic methodology does not allow representing the typical situations that future engineers will have in real manufacturing processes.

Therefore, a new lab assignment was developed for SPC course of the Industrial Engineering program at the Pontificia Universidad Javeriana Cali in the Process Automation Center. The main purpose was to involve students in industrial environments integrating Industry 4.0. An information and communication system integrated and supervised a Flexible Manufacturing Cell, composed by CNC machines, robotic arms, and an automatic storage system. Hence, supply, transport, manufacturing, assembly, storage, and supervision processes was integrated into an emulated environment.

This lab assignment has been carried out since the second semester of 2018 and it has been evaluated with ABET Student Outcomes. At the end of the assignment, students will develop an ability to conduct experiments and analyze data, to work in teams and to have effective communication through a written report.

Keywords: *statistical process control; industry 4.0; control charts*

1 Introducción

La Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) Cali, dentro del núcleo de formación fundamental de la carrera de Ingeniería Industrial, tiene la asignatura de Control Estadístico de Procesos (CEP). En este curso se aplican los conceptos de inferencia estadística y teoría de probabilidades, adquiridos en cursos anteriores, con el fin identificar y solucionar problemas enfocados al mejoramiento continuo, mediante la metodología del P.H.V.A (planear, hacer, verificar y actuar) (Programa de curso CEP, 2018). Dentro del contenido programático de la asignatura se encuentra la implementación de prácticas de laboratorio fundamentales que potencializan el aprendizaje de los estudiantes para entender el significado de la calidad.

La calidad, desde la perspectiva del cliente, es el grado de satisfacción del cumplimiento de sus expectativas (Gutierrez & de la Vara, 2013). Para que un producto cumpla con estos requerimientos, el proceso de fabricación debe ser capaz y estable. La capacidad es el cumplimiento de la tolerancia de la característica de calidad. La estabilidad hace referencia a la ausencia de causas asignables de variación. Esto quiere decir que "el proceso debe operar con poca variabilidad en las dimensiones objetivas del mismo" (Montgomery, 2007). Para que esto se cumpla, es necesario realizar un análisis adecuado de los datos por medio del CEP, el cual es un grupo de técnicas para controlar, monitorear y mejorar procesos con el fin de mejorar la calidad (Gutierrez & de la Vara, 2013). Una de las más utilizadas para controlar la estabilidad de un proceso son los Gráficos o Cuadros de Control (CC). Los CC son representaciones gráficas para controlar y monitorear una característica del producto medido de una muestra a través del tiempo.

Es fundamental el acercamiento, por parte de los estudiantes, al uso de estas técnicas en procesos productivos para monitorear el comportamiento de las variables críticas de los mismos (Heizer & Render, 2001). Por esta razón, inicialmente la práctica de laboratorio de CC para variables continuas consistía en la medición del diámetro de una línea de producción de pelotas de Ping-Pong de diferentes colores del mismo tamaño. El escenario práctico contaba con dos bandas transportadoras continuas donde las pelotas de Ping-Pong eran suministradas por el monitor o profesor con un flujo aleatorio. Los estudiantes se ubicaban a lo largo de la banda, como se puede observar en la Figura 1, con un calibrador con comparador de carátula y precisión de milésima de pulgada. Cada uno escogía un color para tomar, sistemáticamente en intervalos de tiempos iguales, 40 muestras agrupadas de 3 observaciones para graficar el $CC-\bar{X}R$, y 40 muestras independientes para graficar el $CC-\bar{X}Rm$. Los estudiantes medían la pieza y registraban el dato en un formato de recolección donde podía ubicar el punto en CC prediseñados. (Vinasco, 2009).

La práctica anteriormente descrita cumplía con el objetivo del curso. Sin embargo, se identificaron las siguientes limitaciones en la formación de los estudiantes:



Figura 1. Práctica de Laboratorio 2018.1

- Las piezas a medir son prefabricadas y no son representativas a ningún producto de la industria local.
- La forma en la que se induce la aleatoriedad entre las piezas no permite comparar las mediciones realizadas por los estudiantes con la verdadera dimensión de las piezas.

- Las piezas utilizadas no están vinculadas a ningún proceso de fabricación visible. Debido a esto, no es fácil asociar las causas de variación encontradas con el proceso de fabricación.
- La metodología didáctica no permite representar las situaciones típicas que afrontaran los futuros ingenieros en los diferentes procesos de manufactura reales.

Es importante que los futuros ingenieros reciban una formación práctica en ambientes industriales y tecnologías de vanguardia tales como la industria 4.0 (Benešová & Tupa, 2017). Este término se define como la transformación del modelo de control y organización de la cadena de valor a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, y los sistemas productivos a través de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). A pesar de que la industria 4.0 haya adoptado diferentes nombres en algunos países, en general, esta se caracteriza por promover una migración de la industria tradicional hacia una red de fábricas inteligentes. Esto permite que los componentes de la cadena de valor sean representados de forma digital formando sistemas ciberfísicos los cuales se comunican unos con otros a través del Internet de las Cosas (Hermann, Pentek, & Otto, 2015). Este nuevo enfoque de implementación de sistemas de fabricación ofrece nuevas capacidades, como la toma de decisiones descentralizada, la personalización masiva, la integración horizontal y vertical y la ingeniería de extremo a extremo (Germany Trade & Invest 2014).

Actualmente, es posible encontrar varias aplicaciones que integran la industria 4.0 y el CEP. Un primer ejemplo es el uso de la infraestructura TIC propuesta por la industria 4.0 en conjunto con el CEP para lograr una trazabilidad y monitoreo de un proceso que permite reducir el costo por defectos en válvulas de cerámica (Nasir et al. 2018). De forma más general, autores como Sanders, Elangeswaran & Wulfsberg (2016) presentan soluciones que ofrece la industria 4.0 a los retos de la implementación de Manufactura Esbelta (*Lean Manufacturing*) donde se incluye el CEP. Adicionalmente, se presenta el Monitoreo Inteligente de Condiciones (*Smart Condition Monitoring*) como la primera aplicación de industria 4.0 que debe ser considerada en el proceso de migrar las fabricas hacia este nuevo paradigma (VDMA, 2017).

Lo anterior muestra la importancia de preparar a los futuros ingenieros para afrontar los cambios presentes y futuros de la industria 4.0 en esta área de la ingeniería industrial. Por esta razón, el objetivo de este manuscrito es describir la nueva práctica de laboratorio y mostrar algunos de los resultados de estudiante de ABET a partir de la entrega del informe escrito.

2 Métodos

Para cumplir con el objetivo de formación propuesto, se debe crear una práctica de laboratorio que cumpla con lo siguiente:

- Las piezas que serán objeto de estudio deben ser fabricadas durante la práctica usando equipos industriales que integran elementos de la industria 4.0.
- Se debe fabricar un producto que sea representativo en la industria y cuyas dimensiones puedan ser medidas con los instrumentos disponibles.

- Se debe introducir aleatoriamente las variaciones a las piezas dependiendo de la tolerancia definida por el profesor del curso.

Para dar respuesta a estos requerimientos, se evaluaron las diferentes posibilidades que brinda la infraestructura de los laboratorios y equipos en la PUJ Cali. De esta evaluación se definen los siguientes recursos para el desarrollo de la práctica:

a) Instrumentos de medición

Para reducir la curva de aprendizaje, se utiliza el mismo instrumento de medición, calibrador análogo con comparador de carátula y precisión de milésima de pulgada, con el cual los estudiantes están familiarizados.

b) Equipos de manufactura

Dentro de los múltiples equipos de manufactura con los que cuenta la PUJ Cali, se decide usar la celda de manufactura flexible (CMF) del Centro de Automatización de Procesos (CAP). Esta celda puede ser configurada de acuerdo a las necesidades productivas o académicas. En la Figura 2 se presentan los elementos que componen la CMF. El proceso inicia en el sistema de almacenamiento automático, el cual se encarga de mover la materia prima desde el depósito a la banda transportadora que lleva el material por cada una de las estaciones. Las primeras estaciones son máquinas CNC, torno y centro de mecanizado, con montaje y desmontaje automático mediante un brazo robótico. Seguidamente, se tiene la estación de inspección por visión computacional y finalmente la estación de ensamble donde interactúan un brazo robótico y un operario.

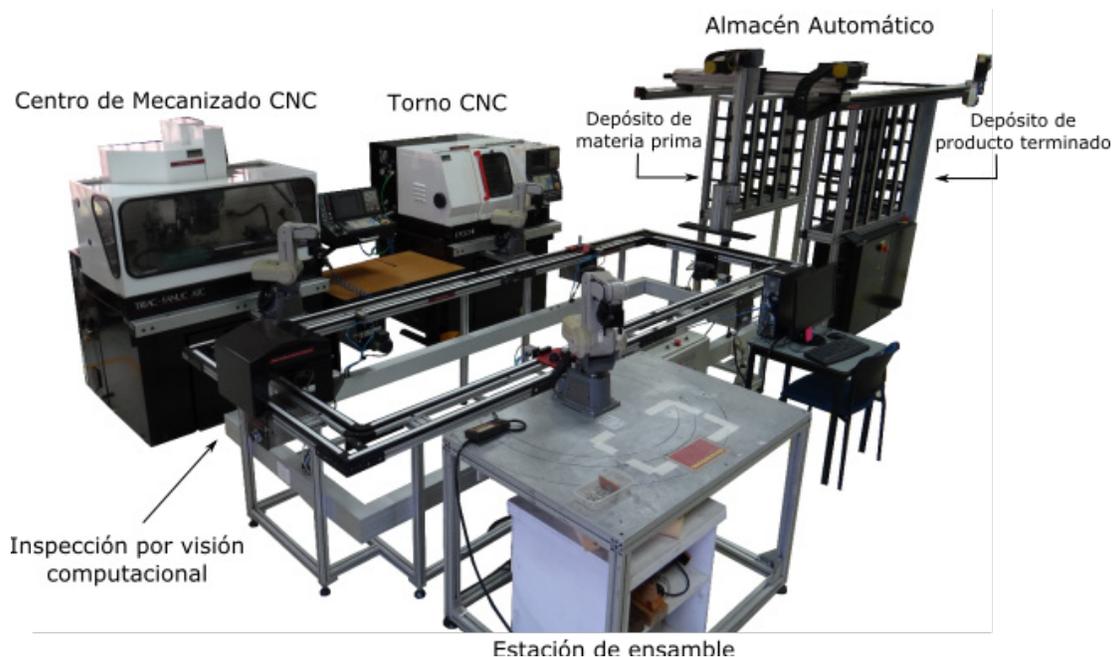


Figura 2. Celda de Manufactura Flexible

La CMF ha sido actualizada en los últimos años para cumplir con las especificaciones de la industria 4.0. Cada una de las estaciones de la CMF está conectada por medio del Internet Industrial de las

Cosas usando el protocolo de comunicación OPC UA, siguiendo los respectivos estándares para la representación de la información (variables y parámetros) y los servicios. Adicionalmente se integran tecnologías como la visión computacional y la robótica cooperativa. Esta infraestructura TIC permite controlar la CMF de forma remota o local a través de internet.

c) Pieza de trabajo

Como pieza de trabajo, que deberá ser fabricada y dimensionada, se decidió utilizar un eje seccionado el cual es una parte típica de cualquier máquina rotativa. Considerando las dimensiones de trabajo de las máquinas CNC de la CMF, se diseñó la pieza que se muestra en la Figura 3, que se mecaniza únicamente en el torno CNC. La materia prima de la pieza es un cilindro de UHMW (polietileno de ultra alto peso molecular). Este material es seleccionado para reducir costos y tiempo de fabricación. La práctica de laboratorio dura dos horas, en las cuales se harán piezas constantemente. El tiempo de ciclo de cada pieza es de 3,32 minutos. Por tanto, se pueden realizar hasta 115 unidades. La especificación del diámetro 1 es $12\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$, mientras que el diámetro 2 es $19\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$.

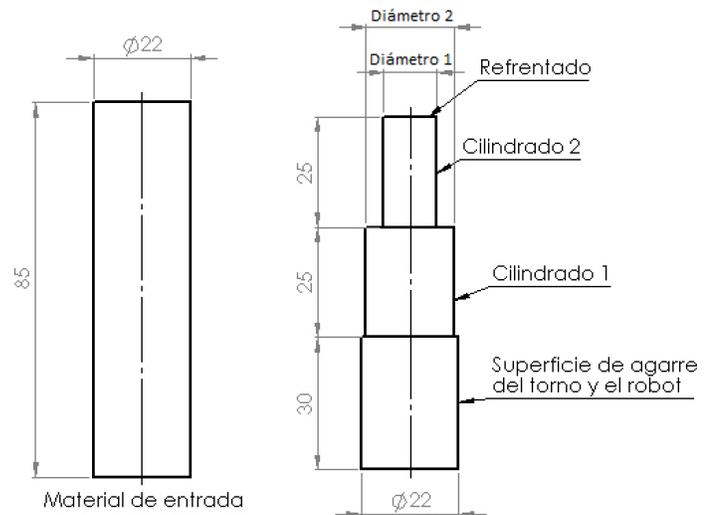


Figura 3 Pieza con dos diámetros (medidas en milímetros)

d) Procedimiento previo a la práctica

Antes de cada práctica, se definen las variaciones que deberán tener las piezas alrededor de un rango de aceptación. Posteriormente, se realizan las instrucciones de manufactura (código G) que deben ser enviadas al torno CNC para la fabricación de cada una de las posibles variaciones. En paralelo se utiliza un software desarrollado en Python para distribuir aleatoriamente las variaciones creando un arreglo de datos que se entrega al sistema de control de la CMF.

La CMF es programada para que el almacén automático inicie la entrega de material cada que se realice un pedido. La estación de torno CNC se programa para ejecutar las operaciones de fabricación de la pieza según las variaciones programadas realizando el montaje y desmontaje automáticamente con el brazo robótico. La estación de centro de mecanizado CNC se inhabilita y su espacio se usa para dar un tiempo de espera en caso de que sea necesario remover viruta o limpiar la pieza. La estación de ensamble se programa para que el brazo robótico retire la pieza terminada de la banda transportadora y la entregue a los estudiantes para que inicien la medición.

e) Procedimiento durante la práctica

Al iniciar la práctica, los estudiantes se organizan en grupos de trabajo alrededor de la CMF. El profesor del CAP les muestra a los participantes cómo se ejecutan los pedidos desde internet al tiempo que el sistema inicia la fabricación. Adicionalmente, se puede obtener en tiempo real datos sobre el estado de las estaciones, tiempos de operación y cantidad de piezas fabricadas; sin embargo, estos datos no están siendo usado para la práctica. Después de la demostración, se deja

corriendo el sistema en automático fabricando piezas continuamente como se ve en la Figura 4(A). Mientras tanto, los estudiantes verifican con un calibrador los diámetros de los ejes y realizan el mismo procedimiento descrito previamente de la práctica anterior (Figura 4(B)).



(A) Robot posicionando pieza en la Banda

(B) Estudiantes tomando las medidas

Figura 4. Práctica de Laboratorio 2018.2

3 Resultados y discusión

Después de la práctica, los estudiantes deben entregar un informe donde explican el procesamiento de los datos y realizan una interpretación de la información, usando la herramienta estadística Minitab® y comparando los resultados con Excel.

Inicialmente, el informe de la práctica estaba ligado a las competencias de ABET de A a la K, como se muestra en la Tabla 1, tales como el A, la habilidad para aplicar el conocimiento de las matemáticas, la ciencia y la ingeniería; el B, habilidad para diseñar y realizar experimentos, así como para analizar e interpretar datos; y el D, habilidad para funcionar en equipos multidisciplinarios. Desde el segundo semestre de 2018, y aprovechando la nueva práctica, se empezaron a utilizar los resultados de estudiante de ABET del 1 al 7 mediante indicadores de desempeño, como se especifica en la Tabla 2.

TABLA 1. Informe de Laboratorio

GRÁFICOS VARIABLES CUANTITATIVAS				
Resultado A a la K		Resultados a entregar *	Resultado 1 al 7	
A	10,00%	a) Realizar el Histograma de frecuencia y la prueba de normalidad	3.3	8,00%
A	10,00%	b) Calcular los límites de control y graficar el cuadro de control	3.3	8,00%
B	23,00%	c) Comparar los límites de control con los límites de especificación	6.2	13,33%
B	23,00%	d) Calcular los indicadores de capacidad	6.3	13,33%
A	10,00%	e) Analizar la información y realizar conclusiones	5.1	15,00%
D	12,00%	f) Escribir recomendaciones sobre los hallazgos	1.2	20,00%
D	12,00%	g) Escriba el procedimiento estandarizado del método adecuado	6.1	13,34%
No se calificaba previamente		Redacción de todo el informe	3.1	4,00%
		Auto y coevaluación del trabajo en equipo	5.2	5,00%

Fuente: *Extraído y modificado de la Guía de Laboratorios (Vinasco, 2009)
TABLA 2. Indicadores de Desempeño

Indicador	Interpretación
1.2	Formular la estrategia para resolver problemas complejos de Ingeniería Industrial en términos del conocimiento, modelos y recursos requeridos (Síntesis).
3.1	Producir comunicación escrita efectiva en cuanto a: organización, estructura, uso del idioma y terminología, enfoque, concisión y adaptación a la audiencia.
3.3	Producir comunicación gráfica efectiva en cuanto a: organización, estructura, uso del idioma y terminología, enfoque, concisión y adaptación a la audiencia (Aplicación).
5.1	Identificar objetivos, planificar tareas y cumplir con los plazos (Comprensión).
5.2	Participar en tareas de equipo y toma de decisiones (Respondiendo).
6.1	Realizar un protocolo experimental o de simulación (Conocimiento).
6.2	Interpretar información numérica relacionada con problemas de ingeniería y relacionados con la disciplina (Aplicación).
6.3	Analizar e interpretar resultados experimentales y de simulación aplicando métodos estadísticos (Análisis).

Fuente: Estela (2018)

Los informes de laboratorio son entregados por equipos de trabajo y calificados de acuerdo a las rúbricas de evaluación. La Figura 5 muestra el promedio del grupo B de CEP, donde el número de estudiantes por cohorte no ha sido estable. Sin embargo, se pueden evidenciar diferencias notorias en algunos de los resultados de estudiante. Uno de ellos es el aspecto b), que es propiamente los CC, mostrando una mejoría respecto a la práctica anterior. Al contrario del aspecto f), referente a las recomendaciones, que mostró una desmejora. En cuanto a las definitivas, son muy similares y no se ve una diferencia significativa.

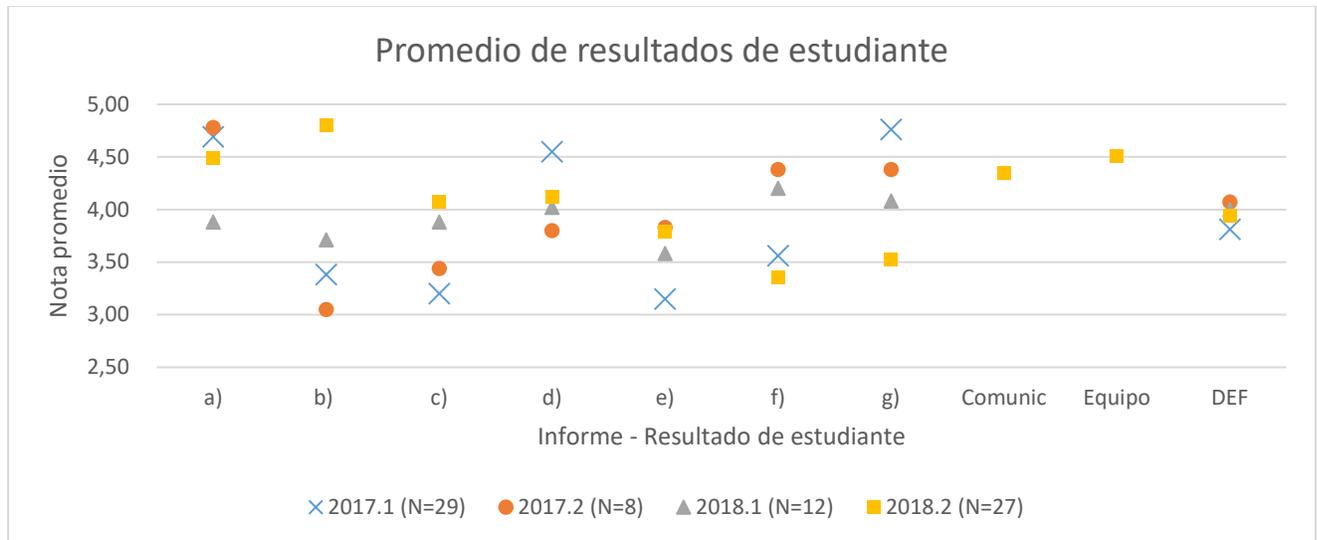


Figura 5. Promedio por punto del informe de cada cohorte

Nota: N hace referencia al número de estudiantes

4 Conclusiones y recomendaciones

Al unir la CMF con la clase de CEP, se cumple el objetivo de integrar una clase tradicional en la industria contemporánea. Sin embargo, existen algunas limitaciones al realizar esta práctica. Una de ellas es el tiempo, ya que la demostración y la toma de datos se debe hacer en menos de dos horas. Al tener grupos con más de 20 estudiantes, la práctica se complica al tener que fabricar más piezas. Por tal motivo, se tuvieron prefabricadas un lote pequeño que se inició a producir una hora antes de la clase para facilitar las mediciones.

Se recomienda que, al tomar datos en tiempo real, los estudiantes puedan subir la información a un formato prediseñado en Excel con los CC. Así podrían tomar decisiones para modificar la CMF en la misma clase si encuentran causas asignables.

Además, esta celda tiene incluida una estación de inspección visual por cámara, como se muestra en la Figura 6, la cual puede ser utilizada en asignaturas como Análisis de los sistemas de medición. En ella se podría comparar un sistema automático con uno análogo en un proceso de producción de un lote.

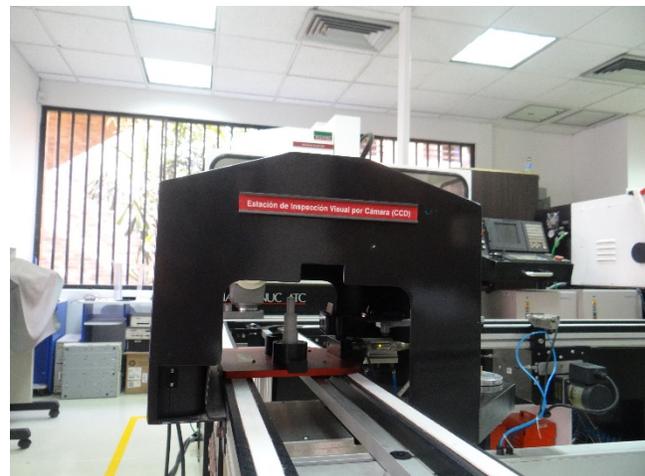


Figura 6. Estación de Inspección Visual

5 Referencias

- Benešová, A., & Tupa, J. (2017). Requirements for Education and Qualification of People in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 2195-2202.
- Estela, J. F. (2018) Relationships between Program Educational Objectives and the new Student Outcomes. School of Engineering. Pontificia Universidad Javeriana Cali. Colombia.
- Germany Trade & Invest. (2014). *Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future*. [en línea] disponible en: <file:///C:/Users/estefany.rey/Downloads/GTAI%20-%20industrie4.0-smart-manufacturing-for-the-future-en.pdf>, consultado en: Junio de 2019.
- Gutiérrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2013). *Control estadístico de la calidad y seis sigma (3a. ed. ed.)*. México: McGraw-Hill Education.
- Heizer, J. & Render, B. (2001) *Administração de operações*. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Hermann, M., Pentek, T. & Otto, B. (2015). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. Technische Unievrstät Dortmund, working paper No. 1/2015.
- Montgomery, D. (2007). *Control estadístico de la calidad (Tercera edición. ed.)* (R. Piña García, Trans.). México, D.F.: Limusa-Willey.
- Nasir, N., Hashim, A. Y. B., Fauadi, M. H. F.Md. & Ito, T. (2018) *Statistical Process Control as a Traceability Tools for Industry 4.0*. *Mechanical Engineering Research Day*, 2, 89-90.
- Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali (2018) Programa de Curso - Control Estadístico de Procesos, Carrera de Ingeniería Industrial, Cali, Colombia.
- Sanders, A., Elangeswaran, C. & Wulfsberg, J. (2016) *Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing*. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(3), 811-833.
- VDMA (2017) *Industrie 4.0 Communication Guideline - Based on OPC UA*. [en línea] disponible en: https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/20743172/Leitfaden_OPC_UA_Englisch_1506415735965.pdf/a2181ec7-a325-44c0-99d2-7332480de281, consultado en: Junio 2019.
- Vinasco Isaza, L. (2009). *Guía de Laboratorios Control Estadístico de Procesos*. Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali. Sello Editorial Javeriano.

Sobre los autores

- **Hader Alberto Madera**, tecnólogo en electrónica de Universidad del Valle, ingeniero de sistemas de la Universidad San Martín Cali, actualmente estudiante Maestría en Automática de Universidad del Valle, laboratorista de la carrera de Ingeniería Industrial, Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali. hader.madera@javerianacali.edu.co
- **Juan David Contreras**, Ingeniero mecánico y Máster en Ingeniería de la Universidad del Valle. Coordinador del Centro de Automatización de Proceso y profesor de cátedra de Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali. juandavid.contreras@javerianacali.edu.co
- **Estefany Rey Becerra**, Ingeniera Industrial de la Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, Máster en Ingeniería y Gestión del Politécnico di Milano. Profesora Instructor de

planta de Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali.
estefany.rey@javerianacali.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)