



Encuentro Internacional de  
Educación en Ingeniería ACOFI

**GESTIÓN, CALIDAD Y DESARROLLO  
EN LAS FACULTADES DE INGENIERÍA**

Cartagena de Indias, Colombia  
18 al 21 de septiembre de 2018



# **DESARROLLO DE HABILIDADES PARA DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS DE CONTROL**

**Édinson Franco Mejía, Asfur Barandica, Edison Arley Díaz**

**Universidad del Valle  
Santiago de Cali, Colombia**

## **Resumen**

En este artículo se presenta una metodología propuesta para desarrollar habilidades en el DDF de sistemas de control (para estudiantes en formación, de los programas de tecnología en electrónica e ingenierías eléctrica y electrónica), y los resultados de una encuesta corta aplicada a tres grupos de prueba muestreados para probar la posible aceptación de los usuarios con respecto a la metodología y las herramientas disponibles. El trabajo ha sido financiado por la Universidad del Valle bajo el proyecto CI2806.

**Palabras clave:** metodología; habilidades en diagnóstico de fallas; aprendizaje activo

## **Abstract**

*In this paper, a proposed methodology to develop skills in the DDF of control systems (for undergraduate students, of electronic technology programs and electrical and electronic engineering), and the results of a short survey applied to three groups to test the possible acceptance or not of users with respect to the methodology and tools available. The work has been funded by Universidad Del Valle under project CI2806.*

**Keywords:** methodology; fault diagnosis skills; active learning

## 1. Introducción

Las fallas en el proceso productivo implican grandes costos financieros que se reflejan en la pérdida de eficiencia y competitividad. El currículo tradicional en las universidades se enfoca en enseñar técnicas de diseño, pero no en desarrollar habilidades que permitan a los ingenieros garantizar la buena funcionalidad de los sistemas o procesos. En el proceso de enseñanza-aprendizaje de las tecnologías y la ingeniería, es deseable que los alumnos tengan un acercamiento a su espacio laboral, pero es difícil por la diversidad de sistemas que existen y porque la automatización de sistemas cubre muchas disciplinas de la ingeniería. Adicionalmente, los currículos de formación de pregrado soportan un alto número de créditos que hace muy difícil incluir nuevas componentes necesarias para la formación del futuro profesional.

El problema alrededor de la necesidad de implementar una metodología para desarrollar habilidades en diagnóstico de fallas de procesos industriales en los programas de ingeniería actuales sin introducir nuevos temas, es un tema abierto que merece atención. Para dar solución a la necesidad planteada, se consultan bases de datos como la IEEE y Science Direct utilizando las ecuaciones de búsqueda: "Methodologies for training in fault detection and diagnosis on industrial control system", "The humans training in fault detection and diagnosis on industrial control system" y "Teaching and learning in Faults Detection and Diagnosis".

La mayoría de las referencias consultadas, (entre las que se destacan J. Antonino-Daviu et al. (2012), Zhao et al. (2012), Marsiletti et al. (1997), Nadia Linou & Tom Kontogiannis (2011), Galpin S. (2000)) tienen como aspecto común el concepto de simulador. La revisión bibliográfica mostró como existe un número de plantas dedicadas a formación en diagnóstico de fallas, la mayoría para casos de aplicación específica hacia un sector específico. Se encontró un desarrollo en hardware dirigido al sector educativo, desarrollada por la empresa Feedback y otro desarrollo de herramientas software producidas por la empresa Simutech (2018), ambas dirigidas fundamentalmente hacia el diagnóstico de fallas a través de casos de aplicación. Finalmente, en la Universidad del Valle como parte de un proyecto de educación en ingeniería se desarrolló la herramienta HAPID orientada hacia el análisis de controladores PID, en la cual se incluyeron opciones de simulación de fallas (Ramírez, 2015).

Para avanzar en la solución de la necesidad planteada, se desarrolló el proyecto CI2806, el cual involucro tres desarrollos para disponer herramientas que permitan desarrollar habilidades en DDF; el primero consistió en proponer una metodología para desarrollar las habilidades, la cual se realizó a partir de experiencias previas e investigación bibliográfica; el segundo es una planta piloto para un control de nivel, la cual usa elementos 100% industriales, las fallas son introducidas por el profesor utilizando un teléfono inteligente con una única interfaz; y el tercero es una herramienta virtual, que simula la planta de nivel, para entrenamiento previo de los estudiantes. En este artículo se presenta una metodología propuesta para desarrollar habilidades en el DDF de sistemas de control para estudiantes de tecnologías e ingenierías; y una encuesta corta aplicada a tres grupos de prueba muestreados para probar la posible aceptación de los usuarios con respecto a la metodología y las herramientas disponibles.

## 2. Investigación en fallas en procesos industriales

Para definir los resultados de aprendizaje (que por limitaciones del paper no se presentan), se realizó un estudio de las fallas más comunes que se presentan en los procesos industriales, se revisó la literatura y se consultó a ingenieros de las industrias de la región; el método de consulta consistió en encuestas dirigidas a ingenieros de proceso e ingenieros de desarrollo y mantenimiento de sistemas de control automático con alto reconocimiento de experiencia en el sector productivo (Díaz, E.A., 2017). El análisis de la encuesta mostró que existe una gran variedad de fallas que se pueden resumir, dependiendo de la instrumentación y del proceso, así: daño del sensor primario, desajustes mecánicos en los cables eléctricos del sensor, daño en el actuador (válvulas neumáticas, motores, calefactores, etc.), taponamiento-obstrucción de tubería, problemas en el mismo proceso (fugas, desgaste, aislamiento térmico, fisuras), y problemas de ruido eléctrico. Se observó que los ingenieros de la región relacionan en alto grado las fallas con problemas físicos asociados al hardware y ruido eléctrico, y no reportan fallas asociadas a la planta o proceso bajo control; esta encuesta fue complementada por académicos de los grupos de Investigación en Control Industrial y Percepción y Sistemas inteligentes de la Universidad el Valle quienes han identificado otras fallas que se presentan en los elementos de la bucla típica de realimentación: fallas en el transmisor (pérdida de medida, amplificación de ruido y calibración inadecuada), fallas en los elementos de control o actuadores (p.e. para una válvula envejecimiento del resorte, histéresis y desgaste del vástago) y fallas en el controlador: sintonía muy suave, excesiva acción proporcional, excesiva acción derivativa y tiempo de muestreo inadecuado, Ramírez M. (2015).

| <b>Fallas en elementos de medición y comunicación</b> |  |
|---|--|
| 1   | Pérdida de medida  |
| 2   | Amplificación de ruido   |
| 3   | Calibración inadecuada   |
| 4   | Pérdida de datos o información   |
| 5   | Desajustes mecánicos en cables eléctricos del sensor                   |
| 6   | Daño en el sensor primario   |
| 7   | Problemas de ruido eléctrico   |
| <b>Fallas en elementos de actuación</b>               |  |
| 8   | Daño en el actuador (válvulas neumáticas, motores, calefactores, etc.) |
| 9   | Motobomba: fase caída  |
| 10  | En válvula de control, envejecimiento del resorte                      |
| 11  | Desgaste del vástago en válvulas                                       |
| 12  | Histéresis   |
| 13  | Válvula bloqueada  |
| 14  | Fugas en la empaquetadura de la válvula                                |
| <b>Fallas en el proceso</b>                           |  |
| 15  | Taponamiento-obstrucción de tubería                                    |
| 16  | Fugas, desgaste, aislamiento térmico, fisuras, etc...                  |
| <b>Fallas en el controlador</b>                       |  |
| 17  | Problemas con la comunicación, pérdida de señal de control             |
| 18  | Sintonía muy suave del control   |
| 19  | Excesiva acción proporcional   |
| 20  | Excesiva acción derivativa   |
| 21  | Tiempo de muestreo inadecuado  |
| 22  | Errores de programación  |
| 23  | Fallas en la fuente de alimentación                                    |
| 24  | Ruido eléctrico  |

Tabla 1. Clasificación de fallas en un lazo de control.

Considerando los resultados previamente descritos, se puede concluir que existen en un lazo de control fallas asociadas a cuatro elementos fundamentales las cuales fueron organizadas y presentadas en la tabla 1 con los efectos que se manifiestan como problemáticos.

### 3. Metodología propuesta

La metodología de formación para desarrollar habilidades en diagnóstico de fallas en sistemas de control propuesta está conformada por dos aspectos, el primero desde el enfoque de procedimiento por parte del aprendiz para guiarlo en la elaboración mental de búsqueda de la solución al problema; el segundo aspecto asociado a la metodología propuesta para alcanzar las habilidades en el marco del desarrollo de la formación superior.

En educación, en cuanto a diagnóstico de fallas se han desarrollado algunos trabajos donde se demuestra la importancia de diferentes maneras de adquirir el conocimiento para identificar y resolver fallas en los sistemas de control; en Linou (Nadia Linou & Tom Kontogiannis, 2011) se señala la importancia del papel que desempeña el hombre como operador en sistemas automatizados modernos; además, se indica el diagnóstico de fallas como una tarea difícil que exige a los operadores hacer frente y conocer con rigurosidad cada parte del proceso; por lo tanto, es necesario un conjunto de instrucciones visibles que permitan adquirir conocimiento de diagnóstico y principios de operación de la planta representados a través de una interfaz. Las instrucciones visibles están “implícitas” durante el desempeño de tareas y se convierten en una parte interna del sistema y del trabajo. En contraste, las instrucciones verbales son externas a la tarea real porque se presentan durante el entrenamiento. La hipótesis planteada por Linou (Nadia Linou & Tom Kontogiannis, 2011) es que los mecanismos de aprendizaje con estrategias visibles, en lugar de instrucciones verbales, pueden proporcionar una buena base para la adquisición y retención de habilidades para encontrar fallas.

La información de formación sistémica cubre varios aspectos estructurales, funcionales, físicos (por ejemplo, enlaces causales) y funciones de supervisión (por ejemplo, control e instrumentación del sistema). Las estrategias de detección de fallas, en particular las que requieren que los alumnos desarrollen su propio diagnóstico, deben ser específicas al contexto en el sentido de que se debe proporcionar a los estudiantes información para guiarlos, de esta manera asegurar que cada alumno entienda y adquiera las competencias de diagnóstico. En este sentido, y con el fin de orientar el desarrollo de habilidades para diagnóstico de fallas, se propone el algoritmo que se presenta en la figura 1, el cual se centra en los bloques “identificación de la falla” y de “diagnóstico de la falla”. Después de haber recibido la solicitud para resolver la falla, el estudiante deberá identificar geográficamente el área de ubicación, lo que implica determinar con precisión el subsistema afectado y que será objeto de análisis, definir los eventos que requiere monitorear para generar hipótesis de probables causas de daño y los elementos en falla. Posteriormente entra en un ciclo de tratamiento de las hipótesis que consiste en seleccionar la más probable y verificar si explica el conjunto de síntomas registrados previamente, si no los explica se procederá a examinar otra de las hipótesis definidas como probables o a modificar la hipótesis propuesta; si explica el conjunto de síntomas, se procede a verificarla.

Posteriormente se procede a evaluar si la falla ha sido resuelta o no. Si se resolvió, se identifica la causa y se documenta. Si no se resolvió, se procede de nuevo desde el comienzo a ubicar geográficamente el área de ubicación de la falla, y todo el proceso descrito anteriormente.

#### 4. Diseño de cuestionario para evaluación

Para la evaluación de la metodología presentada, se diseñó el formulario que guiará al estudiante a identificar, diagnosticar y solucionar la falla a partir de generación de hipótesis. La tabla 2 muestra el formulario de recolección de información durante el uso del sistema de control LUV.

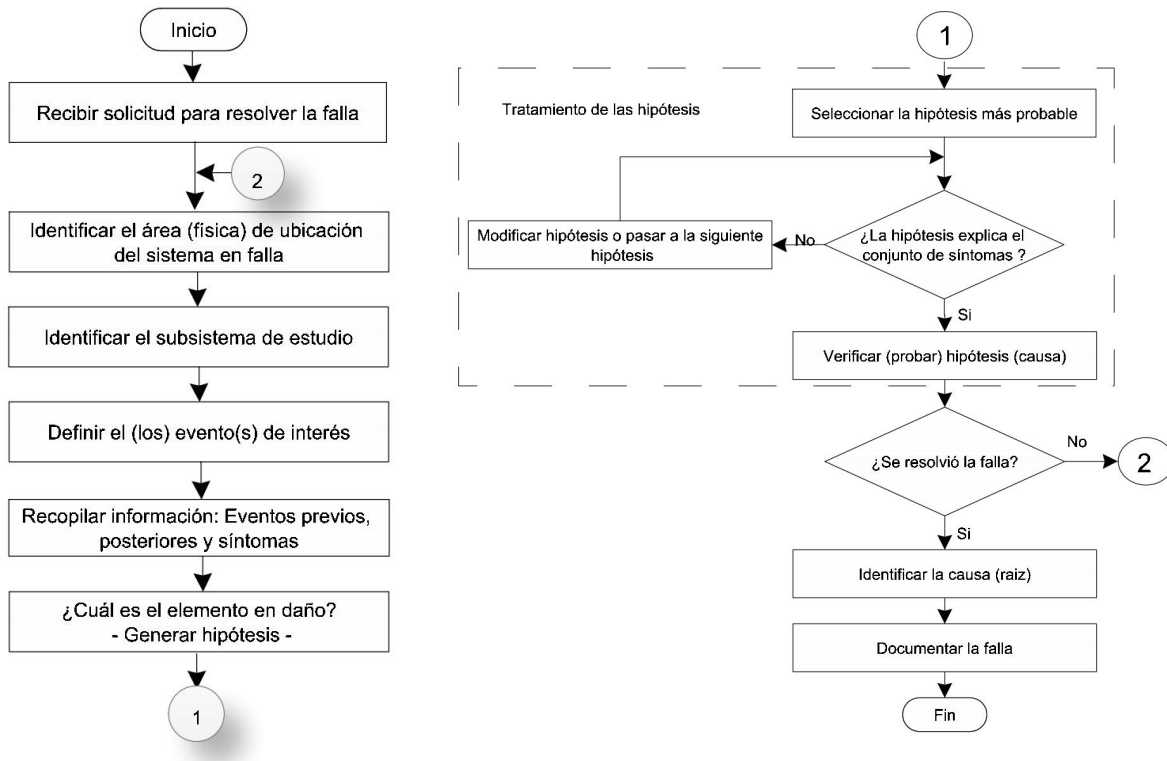


Figura 1. Algoritmo para detección y diagnóstico de fallas

Las fallas son inducidas por el profesor usando una APP desarrollada para el fin, y es introducida en un instante  $t$ , después de que los estudiantes se encuentran operando la planta sin dificultades. Una vez ubicada la falla, si es posible resolver la falla con los recursos disponibles en el momento, el grupo procede a la solución; si no es posible, el reporta al profesor quien aprueba o desaprueba la respuesta; si la respuesta es correcta, se procede a registrar el tiempo de solución. Cabe indicar que los grupos conocen el modelo de la planta, la velocidad de la respuesta de la planta en lazo abierto y en lazo cerrado con el controlador ajustado, y que pueden observar la respuesta del proceso en el HMI; además, disponen de un multímetro para chequeo de señales.

## 5. Herramientas de experimentación.

Para desarrollar habilidades en DDF, el grupo de investigadores desarrolló tres herramientas de experimentación: dos hardware y un software. Las herramientas hardware son dos plantas, una con un sistema multivariable que se encuentra en fase final de desarrollo, y la otra un lazo simple de control de un proceso de nivel típico industrial (LUV), ver Figura 2a, con su respectiva APP para interacción del docente con el proceso, ver Figura 2b.

## 6. Resultados del piloto

Se presentan tres escenarios diferentes sobre el sistema de control de nivel LUV desarrollado en el TG (Díaz, E.A., 2017): G1. Falla en el transmisor de nivel (Item 6, Tabla 1); G2. Pérdida de sintonía del controlador (Item 18, Tabla 1); y G3. Fuga de nivel en el tanque principal por fisura de la tubería (Item 16, Tabla 1) y se conformaron tres grupos de estudiantes (tres estudiantes por grupo de décimo semestre de ingeniería eléctrica). Cada grupo se sometió a una de los tres escenarios de forma aleatoria, estos estudiantes ya han tomado los cursos de Sistemas Automáticos de Control, pero a diferencia de los estudiantes de ingeniería electrónica y de los estudiantes de tecnología en electrónica, ellos no toman el curso en instrumentación electrónica, ni en instrumentación industrial. En la tabla 3 se pregunta a los estudiantes aspectos relativos a su experiencia.

| <b>FORMULARIO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN<br/>DIAGNÓSTICO DE FALLAS SISTEMAS DE CONTROL - UNIVERSIDAD DEL VALLE</b> |  |
|---|--|
| Comportamiento anormal del proceso:   |  |
| Eventos previos:  |  |
| Establecer los síntomas:  |  |
| Hipótesis de posibles causas:   |  |
| 1.  |  |
| 2.  |  |
| 3.  |  |
| Nota: Utilizar hoja extra si es necesario   |  |
| Hipótesis más probable:   |  |
| Verifique si la hipótesis explica el conjunto de síntomas registrados:  |  |
| Haga una descripción detallada de la falla:   |  |
| Establezca las recomendaciones:   |  |
| Escriba el procedimiento para dar solución a la falla identificada:   |  |

Tabla 2. Formulario de recolección de información.

| Item\Grupo  | G1    | G2  | G3    |
|---|-------|-----|-------|
| Tiempo que demora en diagnosticar adecuadamente la falla (horas, minutos) | 2h30' | 50' | 1h45' |
| # de intentos hasta llegar a la solución (hipótesis posibles causas)      | 3     | 2   | 4     |
| Apego a la metodología (%)  | 60    | 80  | 50    |
| Nivel de satisfacción (%)   | 50    | 90  | 90    |

Tabla 3. Seguimiento del proceso en los Grupos pilotos

## 7. Análisis y conclusiones

Se dispone de una metodología propuesta para inducir al estudiante hacia el desarrollo de habilidades para el diagnóstico de fallas, la cual puede ser aplicada en cualquier etapa de formación de los estudiantes frente a un lazo típico de realimentación. La aplicación de la metodología debe considerar el nivel de formación del estudiante, esto es, si el estudiante está cursando una asignatura en mediciones eléctrica y no ha cursado p.e. sistemas de control, solo será posible simular fallas en el sensor.

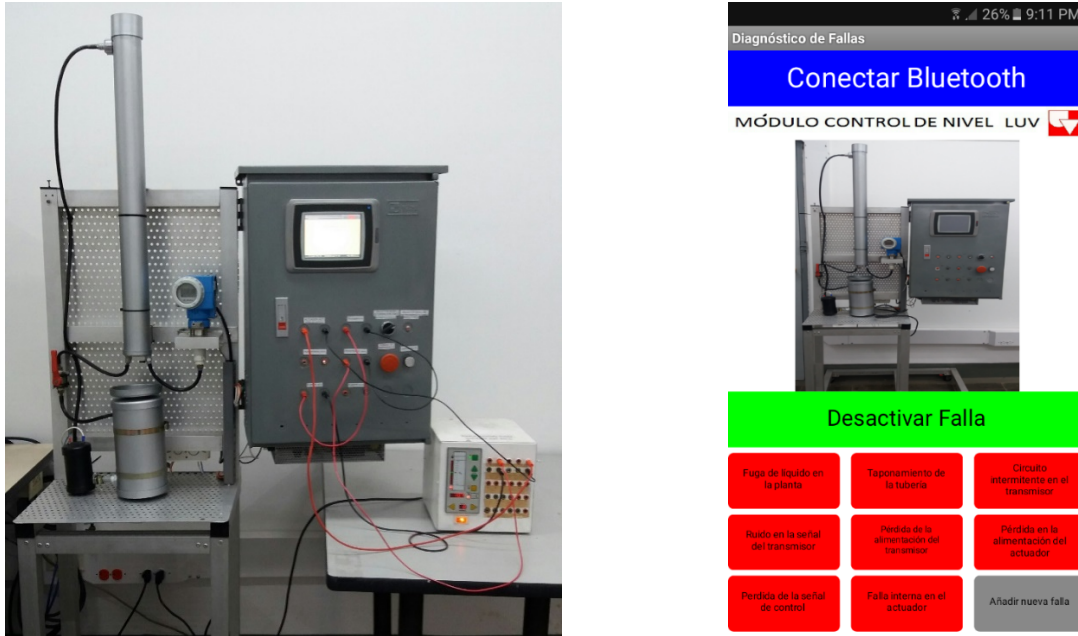


Figura 2. 2a, Izquierda, Proceso con controlador PID externo; 2b, Derecha App.

A pesar de que el piloto realizado hasta el momento es muy pequeño y poco informativo, es positivo el hecho de no encontrar rechazo al uso de las herramientas desarrolladas (nivel de satisfacción: 50%,90%,90%).

Los resultados del apego a la metodología no son plenamente satisfactorios, pero la muestra es realmente muy pequeña para ser concluyente, se debe continuar el proceso de explicación y formación de la metodología en los grupos de trabajo.

## Referencias

### Artículos de revistas

- Nadia Linou & Tom Kontogiannis (2011) A Training Approach to the Acquisition and Retention of Fault-Finding Skills: Making Instructions "Visible" on the Interface, International Journal of Human-Computer Interaction, 18:1, 59-84, DOI: 10.1207/s15327590ijhc1801\_4.

- Y.-L. Su and T. Govindaraj (1986), "Fault Diagnosis in a Large Dynamic System: Experiments on a Training Simulator," IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, vol. 16, no. 1, pp. 129–141, 1986.

### Libros

- Díaz, E.A. (2017). Módulo de control de nivel para propósitos de Educación en diagnóstico de fallas en sistemas de Control. Trabajo de Grado para optar al título de ingeniero electricista. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica-Facultad de Ingeniería-Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Ramírez M. (2015). Aplicaciones informáticas para apoyar el aprendizaje por proyectos de sistemas de control. Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Automática. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica-Facultad de Ingeniería-Universidad del Valle, Santiago de Cali.

### Memorias de congresos

- J. Antonino-Daviu, J. Pons-Llinares, V. Climente-Alarcon, J. Roger-Folch, and M. Riera-Guasp, (2012) "Educational laboratory test benches for induction motor fault diagnosis training," in Proceedings - 2012 6th IEEE International Conference on E-Learning in Industrial Electronics, ICELIE 2012. Montreal, QC: IEEE, 2012, pp. 52–58.
- C.-Y. Zhao, J.-J. Liu, W. Tang, L. Huo, and L. Ma, (2012) "Research on Design of Fault Diagnosis Training Using Electronic Equipment Virtual Prototype," in Proceedings - 2012 International conference on quality, reliability, risk, maintenance, and safety 18engineering. Chengdu, China: IEEE, 2012, pp. 627–630.

### Fuentes electrónicas

- M. Marsiletti, A. Santinelli, M. Zuenkov, and A. Poletykin, (1997) "A flexible simulator for training an early fault diagnostic system," in Proceedings - IAEA specialist's meeting on training simulators in nuclear power plants: Experience, programme design and assessment methodology, Essen, Germany, 1997, pp. 198–208. [Online]. Available: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/29/043/29043422.pdf>. Consultado el 19 de Junio de 2018.
- Simutech (2018). <https://www.simutechmultimedia.com/> Consultado el 19 de Junio de 2018.
- Galpin S. (2000). Methods and apparatus for fault-detecting and fault-tolerant process control. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2000075752> Consultado el 19 de Junio de 2018.



## Sobre los autores

- **Édinson Franco Mejía:** Profesor titular, director del Grupo de Investigación en Control Industrial, coordinador académico de posgrados en Automática. Profesor de Identificación, y de Accionamientos Eléctricos en la Universidad del Valle. [edinson.franco@correounivalle.edu.co](mailto:edinson.franco@correounivalle.edu.co)
- **Asfur Barandica:** Profesor asociado, director del programa académico de Ingeniería Eléctrica y profesor de los cursos de Instrumentación Electrónica y Comunicaciones Industriales. [asfur.barandica@correounivalle.edu.co](mailto:asfur.barandica@correounivalle.edu.co)
- **Edison Arley Díaz:** Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle en el año 2017, autor de "Módulo de control de nivel para propósitos de Educación en diagnóstico de fallas en sistemas de Control". Trabajo de grado Laureado. [edison.diaz@correounivalle.edu.co](mailto:edison.diaz@correounivalle.edu.co)

---

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

Copyright © 2018 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)