



**Innovation in research and engineering education:
key factors for global competitiveness**

***Innovación en investigación y educación en ingeniería:
factores claves para la competitividad global***

IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA CDIO EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Sandra Milena Téllez Gutiérrez, Javier Rosero García

**Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia**

Resumen

Frente a los nuevos retos de competitividad y productividad del sector industrial colombiano, es necesario que la formación de los nuevos ingenieros propenda por desarrollar de sus capacidades, habilidades y competencias necesarias que les permita aportar a la innovación del país incluyendo aspectos tecnológicos, de sostenibilidad y construcción social.

Los laboratorios deben brindar al estudiante un espacio para realizar una actividad práctica que refleje la teoría aprendida en el aula, e igualmente deben ser una herramienta pedagógica para desarrollar capacidades de trabajo en equipo, participar en discusiones, resolución de conflictos, prueba y validación de hipótesis, plantear soluciones y recomendaciones, desarrollar competencias de pensamiento crítico, y demostrar habilidades de comunicación oral y escrita. La metodología CDIO™ es implementada en el laboratorio como una estrategia de enseñanza que permite alcanzar esos objetivos.

En el caso del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Nacional de Colombia se han implementado prácticas, basadas en la metodología CDIO™ con nuevas tecnologías que incluyen la integración de equipos y sistemas alrededor de máquinas eléctricas: Máquinas rotativas alimentadas por convertidor de frecuencia (electrónica de potencia) con sistemas de medición y control asociado, tecnologías de información y comunicación TICs industriales e integración a la arquitectura de automatización. De esta forma se pueden incluir conceptos de eficiencia energética, calidad de energía y compatibilidad electromagnética en la operación de motores eléctricos de un proceso productivo.

La nueva metodología de desarrollo de prácticas de laboratorio junto con equipos de nuevas tecnologías, permiten al estudiante adquirir conocimientos y experiencias, desarrollar habilidades y competencias de investigación e innovación, necesarias en su ejercicio profesional que le permita afrontar retos asociados al desempeño de máquinas eléctricas dentro de aplicaciones industriales.

Palabras clave: CDIO; laboratorio; máquinas eléctricas

Abstract

In order to face the new challenges of competitiveness and productivity of the Colombian industrial sector, it is necessary that the new engineers formation is aimed at the development of their abilities and skills necessary to allow them to contribute to the country's innovation including technological aspects of sustainability and social development.

Laboratories must provide students with a space for a practical activity that reflects the theory learned in the classroom, and also must be an educational tool to develop teamwork skills, discussion participation, conflict resolution, hypothesis testing and validation , come up with solutions and recommendations, develop critical thinking competences, and demonstrate abilities of oral and written communication. The CDIOTM methodology is implemented in the laboratory as a teaching strategy which allows reaching these goals.

In the specific case of the Electrical Machines Laboratory of the National University of Colombia practices have been implemented based on the CDIOTM methodology, with new technologies including the integration of equipment and systems around electrical machines: rotating machines fed by frequency converter (power electronics) with measurement systems and associated control, information and communication technologies (ICTs) and integration into automation architecture. In this way, concepts of energy efficiency, power quality and EMC in the operation of electric motors of a production process can be included.

The new development methodology for the laboratory practices along with new technologies equipment, allow students to acquire knowledge and experience, develop abilities, research and innovation competences needed in their professional practice that allows them to face challenges associated with performance of electrical machines in industrial applications.

Keywords: *CDIO; electrical machines; laboratory*

1. Introducción

Dentro de la formación profesional de ingenieros, los laboratorios son espacios académicos que permiten aplicar de forma práctica los conocimientos teóricos. Tradicionalmente, durante las clases en los laboratorios se comprueban las ecuaciones y conceptos teóricos aprendidos previamente; también se permite un acercamiento del estudiante a los equipos correspondientes. Actualmente, el mundo globalizado exige que los profesionales sean integrales en los conocimientos técnicos específicos, además en el desarrollo de habilidades sociales como el trabajo en equipo, resolución de problemas y de competencias en comunicación oral y escrita (Téllez, *et al.*, 2012).

Por estas razones, las prácticas de laboratorio deben ser aprovechadas para enfrentar a los futuros profesionales a situaciones particulares en las que deban tomar decisiones, aprovechar los recursos disponibles, plantear soluciones mediante la interacción con un equipo de personas. Así mismo, es necesario que los estudiantes tengan la oportunidad durante las prácticas de laboratorio de estar en contacto con tecnologías actuales y sistemas reales como los que se utilizan en el sector productivo nacional.

2. Laboratorio de Máquinas Eléctricas

En la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá se encuentra el Laboratorio de Máquinas Eléctricas en donde tradicionalmente se ha contado con transformadores, motores y generadores para que los estudiantes de Ingeniería Eléctrica desarrollen las prácticas correspondientes a esas temáticas. En general, durante el desarrollo de las clases se buscaba la comprobación práctica de las ecuaciones fundamentales y la determinación de los modelos de circuitos de cada una de las máquinas; en algunos casos se estudiaba el comportamiento de la máquina bajo ciertas condiciones de carga.

Durante el último año y a través del Proyecto “*Investigación en Sistemas de Comunicación y Control de Máquinas eléctricas y electrónica de potencia, SC&CMe-D*” [1], los equipos y sistemas del laboratorio se han actualizado y dotado con nuevas tecnologías acordes con las necesidades del sector eléctrico e industrial. El Laboratorio adquirió nuevas bancadas de motores acoplados, que cuentan con sistemas de control, medición y supervisión para realizar gestión de alarmas, diagnóstico de fallas, medición de eficiencia energética del proceso, entre otras prestaciones; algunos de estos equipos se muestran en la Figura 1. El uso de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) en interacción con los conjuntos de motores permiten el estudio de la carga mecánica, medición de par y velocidad y en general el estudio del comportamiento dinámico del conjunto.

Los nuevos equipos han permitido que las prácticas que ahora se realizan tengan un enfoque diferente, en el que se considera la máquina no como un elemento aislado, sino como un equipo integrado dentro de un proceso y que interactúa con sistemas de supervisión, control y comunicaciones. Mediante la utilización de estas plataformas, los estudiantes pueden aplicar conocimientos, aprender acerca de los desempeños y adquirir experticia sobre las máquinas eléctricas (Barkley, 2009).



Figura 1: Nuevos equipos del Laboratorio de Máquinas Eléctricas

[1] El Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional agradece a ABB Colombia la donación de los equipos para este Proyecto de I+D enfocado en la investigación y desarrollo de nuevas técnicas de sistemas de control, protocolos de comunicación y supervisión; además de capacitar en sistemas de automatización y control de sistemas industriales mediante prácticas de laboratorio y equipos demos. Presupuesto total: \$ 196'540.690.

Es importante resaltar que estas nuevas prestaciones del laboratorio, permiten que adicionalmente a las labores de docencia de pregrado, se puedan desarrollar cursos de posgrado, de extensión e investigaciones que respondan a las necesidades del sector industrial.

3. Habilidades CDIO aplicables

La metodología CDIO™, cuya sigla corresponde a Concebir, Diseñar, Implementar y Operar, identifica una iniciativa educativa orientada al rediseño de los currículos en ingeniería a partir de esos cuatro ejes dentro de contextos reales. Busca promover el desarrollo de competencias y habilidades disciplinares y personales de los futuros profesionales, teniendo en cuenta sus dimensiones cognitiva, emocional y actitudinal. De acuerdo con este marco educativo, las habilidades que deben desarrollar los estudiantes se profundizan a medida que avanzan los semestres de su carrera (Crawley, 2001).

Teniendo en cuenta esta herramienta pedagógica y las recomendaciones dadas por Knowlton (2003), se establecieron los objetivos generales para la asignatura Laboratorio de Conversión Electromagnética, perteneciente al programa curricular de Ingeniería Eléctrica. Se espera que el estudiante demuestre su capacidad de:

- Evaluar resultados de las prácticas desarrolladas en el Laboratorio.
- Construir argumentos lógicos para definir el comportamiento de los dispositivos y máquinas eléctricas e identificar soluciones en las diferentes condiciones de operación como velocidad, frecuencia, etc.
- Demostrar escritura coherente y fluida en la interpretación y conclusión de los resultados de los ensayos desarrollados en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas.
- Especificar la viabilidad de ejecución de los ensayos propuestos con los recursos del laboratorio.
- Establecer el procedimiento a seguir para realizar ensayos a motores, generadores y transformadores con base a las normas investigadas.
- Describir los requerimientos y recursos necesarios para desarrollar las pruebas, como por ejemplo equipos necesarios, características nominales y de funcionamiento de las máquinas.

Igualmente, se determinaron los objetivos específicos relacionados con las habilidades CDIO™ de nivel 3 (el valor agregado al ejercicio de la ingeniería es el trabajo en equipo) aplicables, con su correspondiente nivel de profundización. Los resultados, concordantes con lo planteado por Universidad Nacional de Colombia (2010), se relacionan en la Tabla 1, con la siguiente convención: I para *Introdutorio*, E para *Enseñanza* y U para *Uso* de la habilidad.

#	OBJETIVO ESPECIFICO	HABILIDAD	NIVEL
1	Mostrar conocimiento de los diferentes aspectos relacionados con máquinas eléctricas en cuanto a sus componentes, sus comportamientos y las interacciones externas que afectan su desempeño	Pensamiento holístico	U
2	Definir y aplicar las reglas de juego del equipo y participar en las discusiones y negociaciones para resolver conflictos, en el laboratorio	Operación de los grupos	U
3	Capturar información durante la práctica y que con posterioridad pueda analizarla para determinar su utilidad, apoyarse en ella para concluir, probar o refutar sus hipótesis y responder a sus propias preguntas	Operación de los grupos	U
4	Analizar la tendencia estadística de los datos obtenidos, explicar las limitaciones de los mismos, preparar conclusiones con base en esa información y discutir posibles mejoras en el descubrimiento del conocimiento	Prueba y defensa de hipótesis	E

#	OBJETIVO ESPECIFICO	HABILIDAD	NIVEL
5	Discriminar la utilidad de los datos obtenidos en los ensayos del laboratorio y explicar las posibles diferencias entre los resultados	Soluciones y recomendaciones	U
6	Desarrollar competencias de pensamiento crítico a través de la evaluación de pares de los informes de laboratorio presentados	Pensamiento crítico	E
7	Desarrollar competencias de autoevaluación de la práctica en el informe de laboratorio	Toma de conciencia	E
		Formación de equipos eficaces	U
8	Usar adecuadamente las herramientas de comunicación gráfica: Tablas, esquemas y gráficas.	Comunicación escrita	U
9	Redactar de forma concisa, coherente y ordenada las actividades y los resultados de la práctica de laboratorio	Comunicación escrita	U

Tabla 1: Objetivos específicos para el laboratorio de acuerdo a CDIO™

4. Prácticas de Laboratorio diseñadas

Teniendo en cuenta los objetivos planteados y los nuevos equipos y tecnologías disponibles, se diseñaron nuevas prácticas de laboratorio que no están centradas en el estudio de la máquina aislada, sino que definen la máquina eléctrica como parte de un proceso integral que incluye sistemas de medición, control y comunicación, como se muestra en la Figura 2. De esta forma, las experiencias que tienen los estudiantes en el laboratorio les permiten prepararse para enfrentar los retos del sector industrial.

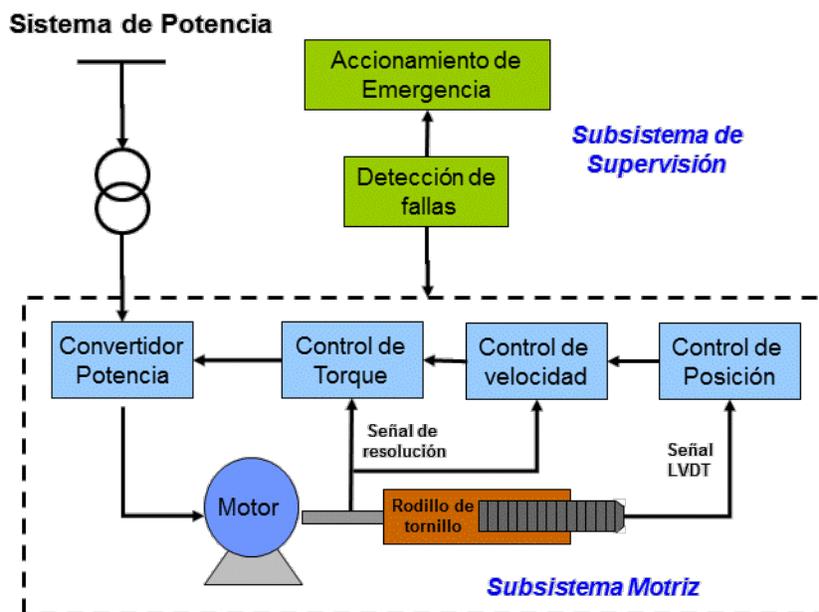


Figura 2: Sistema industrial integral

Por otro lado, el diseño de las nuevas prácticas incluye metodologías innovadoras ya que le plantean al estudiante retos específicos en cuanto a análisis y operación de sistemas integrados con máquinas eléctricas; se diferencian fundamentalmente de las prácticas tradicionales que llevaban al estudiante paso a paso en el montaje de los equipos y la toma de datos. Las prácticas documentadas y el apoyo docente

durante la realización del laboratorio (Stevens, 2005) fomentan la aplicación de los conocimientos teóricos para la resolución de situaciones y el planteamiento de escenarios de operación de las máquinas.

En general, las prácticas y procedimientos documentados abordan cada temática (asociada a cada equipo y sistema bajo estudio) planteando a los estudiantes preguntas abiertas de base conceptual. Al inicio de la clase, el equipo responde y discute estos interrogantes como parte de la preparación previa al diseño y ejecución del montaje. Ya que el laboratorio cuenta con sistemas complementarios integrados a las máquinas, esta actividad estimula el pensamiento holístico.

A partir de la base teórica construida, el grupo debe diseñar un montaje, determinar la instrumentación a utilizar y especificar las condiciones de operación de la máquina en estudio para resolver el reto planteado por la práctica que simulan procesos industriales reales. Para culminar esta etapa, los estudiantes deben establecer hipótesis que deben ser probadas o refutadas por todo el equipo; la habilidad CDIO™ “Operación de los grupos” es fundamental para alcanzar los objetivos. Es importante resaltar que las prestaciones de los nuevos equipos del laboratorio permiten diversidad de situaciones operativas y la disponibilidad de múltiples variables para análisis.

Durante el desarrollo de la práctica, es necesario que los estudiantes propongan diferentes condiciones de operación de los sistemas que les permitan obtener conjuntos de resultados significativos para el posterior análisis y formulación de conclusiones, soluciones y recomendaciones. Todos los datos encontrados durante el desarrollo de la práctica deben consignarse en la Hoja de Resultados asociada al Procedimiento. Finalmente, el equipo de trabajo debe reunirse para la elaboración del informe final, en el que se verán reflejados no sólo el análisis de procesos industriales relacionados con máquinas eléctricas, sino también las competencias de comunicación escrita.

Las nuevas prácticas documentadas para el laboratorio son:

- Conocimiento e Introducción plataforma motor-generador, convertidores y elementos de protección
- Análisis de gestión de energía y/o perturbaciones del conjunto motor-generador y análisis dinámico
- Análisis de gestión energética y eventos transitorios del conjunto motor -generador
- Introducción al banco de pruebas de control de motores de inducción.
- Puesta en marcha y análisis de arranque directo y sofstarter para motor de inducción
- Puesta en marcha de motores y convertidores a valores nominales
- Control de velocidad en lazo abierto para motores de inducción de 4 y 7.5kW
- Control DTC (Direct Torque Control) de velocidad para un motor de inducción de 4 y 7.5 kW
- Control DTC (Direct Torque Control) de par para un motor de inducción de 4 y 7.5 kW
- Determinación de eficiencia de conjunto motor de inducción de jaula de ardilla y variador de velocidad

Durante el desarrollo de estas prácticas el Laboratorio de Máquinas Eléctricas se convierte en un espacio para el aprendizaje, en el que el estudiante tiene experiencias de diseño y montaje relacionadas con los cursos teóricos (Morales, 2013).

La articulación de la metodología CDIO™ y los equipos de nuevas tecnologías a través de prácticas de laboratorio estructuradas pero flexibles, crea nuevos escenarios didácticos en los que el equipo de trabajo se familiariza con los sistemas industriales y se enfrenta al desarrollo de soluciones y aplicaciones reales de aplicación directa en la industria. Adicionalmente, se genera un espacio de trabajo en el que potencia el

desarrollo de habilidades personales y de gestión como liderazgo, trabajo en equipo, comunicación oral y escrita, entre otras.

5. Resultados obtenidos

Con el objetivo de verificar la aplicación y cubrimiento de los estándares CDIO™ detallados en la Tabla 1, se realizaron encuestas de seguimiento entre los estudiantes del curso durante el último semestre, cubriendo un 95% del total de los inscritos en el curso de Laboratorio de Conversión Electromagnética. A través de estas encuestas se buscaba la percepción de los estudiantes en cuanto a la relación de los objetivos específicos del curso con las actividades realizadas de acuerdo a la nueva metodología y el desarrollo de las nuevas prácticas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2:

#	OBJETIVO ESPECIFICO	ACTIVIDADES	PERCEPCIÓN ESTUDIANTIL		
			Aceptable	Buena	Excelente
1	Conocimiento de máquinas eléctricas	<ul style="list-style-type: none"> Seguimiento grupal de procedimientos establecidos Respuestas a preguntas abiertas 	20%	62%	18%
2	Reglas de trabajo en equipo, discusiones y negociaciones	<ul style="list-style-type: none"> Diseño del montaje, discusión previa guiada por el docente Especificación de condiciones de operación 	9%	57%	34%
3	Captura y análisis de información útil	<ul style="list-style-type: none"> Determinación de instrumentación a utilizar Completar la hoja de resultados 	15%	60%	25%
4	Análisis estadístico de los datos de practicas	<ul style="list-style-type: none"> Discusión grupal Elaboración del informe final 	18%	70%	12%
5	Explicación de las diferencias entre los resultados esperados y los encontrados	<ul style="list-style-type: none"> Prueba de hipótesis, discusión grupal Elaboración del informe final 	10%	65%	25%
6	Competencias de coevaluación y autoevaluación	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación de informes de otros grupos Matriz de coevaluación de compañeros de grupo 	12%	57%	31%
8	Uso de herramientas de comunicación gráfica	<ul style="list-style-type: none"> Discusión grupal Elaboración de informe final 	22%	64%	14%
9	Redacción concisa y coherente de informes de laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> Matriz de evaluación de trabajos escritos Elaboración de informe final 	15%	40%	45%

Tabla 2: Percepción de los estudiantes del cubrimiento de estándares CDIO™

En general puede verse que la implementación de la metodología CDIO™ tiene un impacto positivo para los estudiantes, en especial en las habilidades relacionadas con trabajo en equipo, autoevaluación y coevaluación; por ejemplo el uso de matrices para la evaluación de trabajos escritos permite que los equipos de trabajo pongan atención a aspectos que antes desconocían.

También se encontró que los estudiantes manifiestan que las prestaciones de los nuevos equipos disponibles en el laboratorio, facilitan y apoyan el desarrollo de habilidades relacionadas con el análisis y operación de máquinas eléctricas.

6. Conclusiones

La aplicación de la metodología CDIO™ sumada a la disponibilidad de nuevas tecnologías en el laboratorio, permite la integración y evaluación de sistemas asociados a máquinas eléctricas para que el estudiante se capacite y desarrolle habilidades que son necesarias para su desempeño profesional.

El diseño y documentación de prácticas de laboratorio que incluyan metodologías innovadoras, sirven de apoyo al docente y al estudiante para fomentar el conocimiento y desarrollo tecnológico.

El desarrollo de prácticas de laboratorio utilizando la herramienta pedagógica CDIO™, genera espacios de trabajo conjunto que permiten desarrollar habilidades y competencias personales, emocionales y profesionales.

La disponibilidad de equipos con nuevas tecnologías permite tener una mayor interacción de los futuros profesionales con la industria y las empresas del sector.

7. Referencias

Libros

- [1] Barkley, E. F. (2009). Student engagement techniques: A handbook for college faculty. San Francisco, CA: Jossey-Bass.
- [2] Crawley, E. F. (2001). The CDIO Syllabus, A statement of goal for undergraduate engineering education. Department of Aeronautics and Astronautics Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, pp 82.
- [3] Knowlton, D. S., & Sharp, D. C.. (2003). Problem-based learning in the information age. New Directions for Teaching and Learning, No. 95. Jossey-Bass, San Francisco.
- [4] Stevens, D. D., & Levi, A. (2005). Introduction to rubrics: An assessment tool to save grading time, convey effective feedback, and promote student learning. Sterling, VA: Stylus.

Memorias de Congresos

- [5] Téllez, S., Rosero, J. (2012). Implementación de CDIO en formación de máquinas eléctricas. Reunión Nacional ACOFI 2012, Medellín

Fuentes electrónicas

- [4] Morales, E., Poblete, P. (2013, Enero). Un nuevo paradigma en la formación de ingenieros a nivel global. Segunda Reunión Latinoamericana CDIO, Santiago de Chile 2013, Consultado el 1 de Mayo de 2013 en:
<http://www.cdio.cl/seminario-web-cdio-formando-los-ingenieros-del-futuro/presentacion-e.-morales>
- [7] Universidad Nacional de Colombia (2010, Noviembre). Informe final: Renovación de la Acreditación del Programa Curricular de Ingeniería Eléctrica. Dirección de Área Curricular Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Consultado el 15 de Febrero de 2013 en: http://www.ing.unal.edu.co/viceacad/_images/stories/viceacad/acreditacion/InformeAutoevaluacionElectrica2010.pdf

Sobre los Autores

- Sandra Milena Téllez Gutiérrez: nació en Bogotá, Colombia en 1975. Recibió el grado de ingeniera electricista de la Universidad Nacional de Colombia en 1997, entre 1997 y 2001 trabajó en diseño y operación de redes de distribución, líneas de transmisión e instalaciones eléctricas. En el año 2003 recibió el título de Especialista en Sistemas de Distribución y en el año 2011 recibió el grado de Magister en Ingeniería Eléctrica, ambos títulos de la Universidad Nacional de Colombia. Desde el año 2002 trabaja como docente e investigadora en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Sus áreas de interés son: Máquinas eléctricas, gestión energética, Smart Grids y movilidad eléctrica. smtellezg@unal.edu.co
- Javier Rosero García: Nació en Potosí, Colombia en 1978. Recibió el grado de ingeniero electricista de la Universidad del Valle, Cali – Colombia en 2002, Entre 2002 y 2004 trabajó en mantenimiento y construcción de sistemas de potencia y subestaciones en Bogotá, Colombia. En 2007 recibió el grado de doctor de la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona. Dr Rosero recibió el premio IEEE AESS Harry Rowe Mimno award for excellence in Technical communications for 2007 from Aerospace and Electronic Systems Society (AESS) IEEE 2007. Desde 2007 a 2009, trabajó en Asea Brown Boveri (ABB), Barcelona como Service Product Manager en soporte técnico de máquinas eléctricas y drives para el sector industrial y generación eólica. Desde el año 2010 trabaja como profesor en el departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C. Dr. Rosero ha realizado más de 40 publicaciones en revistas y congresos IEEE. Dr. Rosero es miembro del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, IEEE, International Society of Automation, ISA y The International Council on Large Electric Systems, CIGRE. Sus área de interés son: modelamiento, simulación y control de máquinas eléctricas y drives, compatibilidad electromagnética (EMC), gestión energética, instrumentación industrial y procesamiento de señal. Movilidad eléctrica y Smart grids. jaroserog@unal.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería y de la International Federation of Engineering Education Societies

Copyright © 2013 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI), International Federation of Engineering Education Societies (IFEES)