

Revisión y análisis de diseño mecatrónico para diseño curricular transdisciplinario de programas de ingeniería multidisciplinares

Review and analysis of mechatronic design

for transdisciplinary curricular design of courses of multidisciplinary engineering

Jaime Humberto Carvajal Rojas

Ingeniero Mecánica, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia
Carvajaljh89@hotmail.com

Abstract— This paper presents a new interdisciplinary and transdisciplinary curricular design for mechatronic engineering education, considering mechatronic design as integrating core. The proposed study plan has two research lines: robotic automation for production systems, and robotics automation for medicine. Here, mechatronic design methodologies, biomechatronic design, and new trends in mechatronic engineering are reviewed.

Key Word — Mechatronic design, Biomechatronic design, Mechatronic engineering, Mechatronic education.

Resume—Este artículo presenta un nuevo diseño curricular interdisciplinario y transdisciplinario para educación en ingeniería mecatrónica, considerando diseño mecatrónico como eje integrador. El nuevo diseño curricular tiene dos líneas de investigación: automatización robótica para sistemas productivos y automatización robótica para medicina. En este sentido, se revisan metodologías de diseño mecatrónico, diseño biomecatrónico y nuevas tendencias en ingeniería mecatrónica.

Palabras claves— Diseño mecatrónico, Diseño biomecatrónico, Ingeniería mecatrónica, Educación en mecatrónica.

I. INTRODUCCIÓN

El diseño mecatrónico transdisciplinario caracteriza a ingeniería mecatrónica. Antes de surgir la mecatrónica los ingenieros electricistas electrónicos tenían dificultades para realizar buen diseño integrado y óptima funcionalidad de los robots industriales, porque no consideraban las perturbaciones originadas en los sistemas mecánicos, tales como, peso de los materiales, fuerzas de inercia de los elementos macizos y vibraciones mecánicas por efecto de la acción de los actuadores y perturbaciones externas. Con esta experiencia, actualmente, los investigadores desarrollan metodologías de diseño mecatrónico a partir de diseño mecánico de la estructura incorporando ciencias y

tecnologías eléctricas electrónicas e informáticas; con el objetivo de optimizar la funcionalidad de los sistemas multidisciplinares integrados en sistemas mecatrónicos.

II. REVISIÓN Y ANÁLISIS DE DISEÑO MECATRÓNICO

Los estudiantes de Ustabuca [1] en Colombia, han desarrollado diseño mecatrónico de prototipo de máquina programable, reprogramable y flexible para dibujo en 2D en el curso diseño mecatrónico en ingeniería mecatrónica, basado en modelaje y simulación virtual. Carvajal y colaboradores [2] en Colombia, exponen el modelo virtual del prototipo de un robot móvil, el modelo matemático de la dinámica del sistema mecánico de la plataforma de ascenso/descenso basado en el tornillo de potencia, el modelo matemático del movimiento del vehículo robotizado basado en el principio del trabajo y energía, el diseño mecánico de los componentes del chasis, el diseño mecánico del sistema de transmisión y del sistema de potencia, modelaje del sistema electrónico constituido por el sistema de control electrónico, el sistema de detección y evasión de obstáculos, el sistema de control de la dinámica de la plataforma móvil, el sistema de control de desplazamiento, la interface Hombre/Máquina y dispositivos periféricos. Estos modelos se integran en un sistema multidisciplinario mediante una metodología de diseño mecatrónico, basada en principios de la Ingeniería Concurrente y simulación virtual. Coelho y colaboradores [3] desarrollan en Brasil un método de diseño mecatrónico de una silla de ruedas enfocado a factores humanos, a bajo costo y ergonómico; integrado por tres módulos: mecánica, electrónica y computación. El método tiene tres funciones: Primero operar totalmente las funciones del sistema mecatrónico. Segundo analizar las tareas, trabajos, actividades de la interacción entre el usuario y el sistema. Tercero interacción total de las funciones. Ortiz Sánchez – Navarro y colaboradores [4] en México, presentan diseño de un robot móvil con tres temas de trabajo: diseño y simulación generando

modelos matemáticos que describen y validan su estructura y funcionamiento; seguido de un proceso de manufactura en el que se cambian algunos parámetros como el material y las dimensiones, pasando por una simulación nuevamente obteniendo varios prototipos de elección; y por último se hace una evaluación del modelo real comparándolo con el modelo matemático con el fin principal de mejorar el comportamiento del sistema.

Yasunori Takemura y colaboradores [5] en Japón, desarrollan metodología de diseño mecatrónico de un robot móvil provisto de inteligencia artificial. Se aplica el concepto de ingeniería concurrente en donde el primer grupo de trabajo realiza diseño mecánico del chasis y de la estructura con actuadores, transmisiones, sensores y cámara de visión integrados. El segundo grupo de trabajo considera los errores mecánicos del primer grupo de trabajo y propone un nuevo diseño mecánico integrando nuevos conceptos como omnidireccionalidad y maniobrabilidad. Finalmente, se aplica el concepto de modularidad con los siguientes pasos: descripción de la arquitectura del sistema robotizado, definición de los posibles módulos específicos, integración de todos los módulos específicos en un gran sistema modular mecatrónico robotizado. Carvajal y colaboradores [6] presentan una metodología de diseño electrónico integrado al diseño mecánico con tres tareas: modelaje virtual de la configuración del prototipo y modelaje de la cinemática y de la dinámica; simulación virtual del sistema de control del sistema mecánico antes de instalarse físicamente e integración real del prototipo para realizar las pruebas de validación. Christian Koch y Colaboradores [7], describen una metodología de diseño mecatrónico VDI Guideline desarrollado en Technische Universität Ilmenau de Alemania, adaptable a cualquier caso particular. El proceso de diseño se divide en subfunciones que permiten un análisis de las interacciones porque a menudo un producto mecatrónico resulta complejo y es probable que se tengan que repetir algunos ciclos del proceso. El método tiene tres fases: Concepción. Fabricación. Integración. Por último, se desarrollan pruebas para validar el funcionamiento.

En la Universidad Católica de Chile [8] se demuestra una metodología de diseño de productos mecatrónicos integrada por tres tareas: diseño, prototipado, industrialización. La metodología se inicia con diseño mecánico clásico y se analizan los elementos adicionales que surgen en el proceso de diseño. Carvajal y colaboradores [9] realizan una metodología de diseño mecatrónico de robots industriales basada en la ingeniería concurrente CE y los sistemas CAD y CAE. Se describen tres tareas: Modelaje matemático de la cinemática y de la dinámica del robot y modelaje gráfico computarizado de la configuración. Simulación gráfica del funcionamiento y de la acción de control. Integración de las tecnologías en un sistema mecatrónico. W. X. Xu y G. Brighth [10] en la Universidad de Massey, Nueva Zelanda, crean diseño

mecatrónico de un robot inteligente que simula una cortadora de césped y puede trazar un mapa de la superficie prevista. En mecánica, se hizo modelo del robot inteligente en CAD y diseño mediante tracción diferencial con maniobrabilidad. En electrónica, se integra microcontrolador y programación en lenguaje C. Para Zbigniew [11] los productos mecatrónicos pueden ser diseñados y manufacturados tan rápidos y baratos como sean deseados. Un tiempo de diseño más corto es una ventaja competitiva. En su artículo presenta dos aproximaciones hacia el diseño de sistemas mecatrónicos; el primero basado en modelaje visual con UML Unified Modeling Language y el segundo basado en modelaje físico con Modélica.

Devdas [12] [13] enseña diseño mecatrónico en tiempo real en donde involucra adquisición de datos, control en tiempo real y procesamiento embebido. Jindong [14] revela una nueva metodología de diseño mecatrónico para un pez robotizado en 3D, denominada MT Mechanical tail. En su tesis de doctorado Hendrik Coeling [15] desarrolla una metodología de aproximación al diseño mecatrónico: diseño conceptual en donde desarrolla el modelo matemático de la planta mediante ecuaciones diferenciales de cuarto orden y establece parámetros dimensionales orientados hacia la optimización del producto; diseño detallado en donde establece la filosofía del diseño del controlador haciendo uso del modelo dinámico de la planta, define las tecnologías que integran el sistema de control PID, analiza el efecto de las perturbaciones y realiza evaluación del sistema de control del sistema mecánico; análisis del comportamiento de las especificaciones de diseño orientada a la optimización del diseño mecatrónico. Finalmente, aplica la metodología propuesta a una planta mecatrónica. Van Amerongen [16] discute el uso de modelaje y simulación basado en software 20 – sim para el análisis y diseño de sistemas mecatrónicos. Carvajal [17] indica que el proceso de diseño mecatrónico para robots puede resumirse en tres tareas teniendo en mente el concepto de ingeniería concurrente: modelaje, simulación del prototipo y desarrollo del diseño. Broenink [18] aplica 20 – sim 3.0 para el modelaje y simulación asistida por computador del sistema de control del producto mecatrónico. Además explica, que la simbiosis entre la academia y la industria para el desarrollo de sistemas mecatrónicos con herramientas computarizadas ha proyectado resultados eficientes en la creación de nuevos productos.

Rolf [19] integra sistemas mecánicos y microelectrónica y abre muchas nuevas posibilidades para los procesos de diseño y funciones automáticas. Venuvinod [20] afirma que el diseño en mecatrónica no es la suma de principios de mecánica, electrónica y computación $M + E + C \neq$ Mecatrónica, no es la unión $M \cup E \cup C \neq$ Mecatrónica y no es la intersección $M \cap E \cap C \neq$ Mecatrónica. Afirma que la mecatrónica es la función que se obtiene con estos principios $F(M, E, C) \rightarrow$ Mecatrónica.

El diseño biomecatrónico aplica el diseño mecatrónico a la anatomía y fisiología humana o animal. Los principios fundamentales de diseño mecatrónico desde la perspectiva de la ingeniería mecánica son descritos: diseño sistemático y creativo

considerando minimización de costos, minimización de espacio, minimización de peso, minimización de pérdidas y optimización e interrelación de funciones. La interrelación de funciones se basa en la interrelación de las partes y sistemas que integran el producto mecatrónico. Una metodología general de diseño mecatrónico define especificaciones, realiza abstracción de la identidad del diseño, establece estructuras funcionales, identifica principios o leyes de las estructuras funcionales, combina principios o leyes de las estructuras funcionales, selecciona combinaciones apropiadas de las estructuras funcionales, genera variantes de principios de solución, evalúa las variantes respecto a criterios tecnológicos y económicos, y presenta el principio de solución o diseño conceptual. Mandenius [21].

El diseño mecatrónico integra tres disciplinas en un nuevo producto, mecánica, electricidad electrónica, e informática. El diseño biomecatrónico integra el diseño mecatrónico a la biología humana. Y se distinguen las siguientes tareas para la realización del diseño mecatrónico: Diseño conceptual: definir función de cada disciplina F_d , cada disciplina se diseña por módulos disciplinares, módulo de diseño mecánico, módulo de diseño eléctrico electrónico, módulo de diseño de software, y establecer parámetros y variables de diseño. Modelado: modelado gráfico, modelado matemático, y aplicación de software especialista para cada disciplina. Simulación: simulación en ambiente virtual de módulos disciplinares o integrados parcialmente, simulación del prototipo mecatrónico, y aplicación de software especialista. Integración: definición de la función transdisciplinar F_t , integración de los módulos disciplinares, optimización de la función transdisciplinaria, optimización del diseño integrado, aplicación de software especialista, desarrollo del diseño en ambiente de Ingeniería Concurrente con ajustes y pruebas de la función transdisciplinar F_t del producto.

III. EDUCACIÓN EN MECATRÓNICA

A. Educación Internacional

Se verifica la existencia de programas de ingeniería, maestría y doctorado en mecatrónica a nivel internacional desde 1983, cuando se creó el primer programa de maestría en ingeniería mecatrónica en Toyohashi University of Technology de Japón. Diseño curricular y perfiles profesionales en educación en mecatrónica se muestran en la Tabla 1. De Europa se consultaron Alemania, España, Reino Unido, Portugal, Francia, Italia, Dinamarca, Holanda, Lituania, Noruega y Turquía. En Francia se verifica, que desarrollan programas de maestría en ingeniería mecatrónica y también desarrollan formación a nivel de técnicos y tecnólogos. De Norte América se consultaron Canadá y Estados Unidos. En los Estados Unidos existen programas de graduación en mecatrónica en

todos los estados de la unión, algunos con desarrollos en maestría y doctorado. De Asia se consultaron China, Taiwán, Corea de Norte, Corea de Sur y Birmania. De África Jordania y Suráfrica. Y de Australia. Con base en esta consulta, se verifican los siguientes perfiles en graduación y pos graduación internacional, en su orden: Diseño mecatrónico, Robótica, Manufactura, Manufactura Avanzada, Automatización industrial, Industria Militar, Industria Automotriz y Automatización y control.

Áreas	Frec	%
Diseño mecatrónico	30	64
Robótica	15	32
Manufactura	7	15
Manufactura Avanzada	7	15
Automatización industrial	4	9
Industria militar	3	6
Industria automotriz	3	6
Automatización y control	2	4

Tabla 1. Diseño curricular y perfiles en mecatrónica internacional

B. Educación en Iberoamérica

Se verifica la oferta de programas denominados ingeniería mecatrónica y afines en Iberoamérica. En Brasil alrededor de 186 programas, en México 135 programas y en Colombia 18 programas. Se verifica también que, hay ofertas de programas de maestría en ingeniería mecatrónica o afines en Brasil, México, Chile, Perú y Colombia. Y programas de doctorado en mecatrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Palmira Cuernavaca, Morelos, México y en la Universidad de Sao Paulo USP, Brasil. **Brasil.** En la USP Brasil se origina el programa de graduación en ingeniería mecatrónica, en 1983. Y se verifica que a partir de esta fecha, en Brasil se han creado más de 186 cursos denominados ingeniería mecatrónica, ingeniería en control y automatización, ingeniería eléctrica automatización y control, ingeniería de producción mecánica, ingeniería en control e instrumentación y otros programas afines multidisciplinarios en ingeniería. El INEP (Instituto Nacional de Estudios y Pesquisas) del Ministerio de Educación de Brasil para efectos de evaluación y titulación en el área de ingeniería, considera siete grupos que teóricamente pueden ser evaluados en forma similar. Los grupos II y III agrupan ingenierías similares por sus contenidos programáticos, afines con ingeniería mecatrónica. Grupo II. Ingenierías de computación, computación-hardware, comunicaciones, control y automatización, redes de comunicación, telecomunicaciones, eléctrica, electrónica, industrial eléctrica y mecatrónica. Grupo III. Ingenierías aeroespacial, aeronáutica, automotriz, industrial, mecánica, mecánica y naval. **México.** Se confirman 135 programas de graduación denominados ingeniería mecatrónica, implementados en todos los estados federales y en ciudad de México. Se evidencia la existencia de doce programas denominados maestría en ingeniería mecatrónica. En México la mecatrónica se caracteriza por dos tendencias fundamentales: (1) Diseño mecatrónico y (2) Automatización industrial. Además, en menor proporción: (3) Robótica, (4) Desarrollo de

productos y procesos, (5) Sistemas de manufactura, (6) Industria automotriz. **Argentina.** La denominación más extendida es de ingeniería electromecánica, que incorpora a la ingeniería mecánica potencia eléctrica y controles electrónicos. Brasil y los países del sur de América consideran a la electrónica como derivación de la electricidad a nivel de baja potencia eléctrica; por tanto, se ofertan programas de ingeniería electricista que extienden su formación profesional hacia la electrónica, la informática, la automática y las telecomunicaciones. **Chile.** Desarrolla seis programas de ingeniería en automatización y robótica. **España.** Desarrolla ingeniería en electrónica y automática, de donde se han derivado programas de maestría y doctorado de base mecatrónica. **Perú.** En la Universidad Católica de Perú se identifica la oferta de maestría en ingeniería mecatrónica con perfil profesional orientado a diseño y construcción de sistemas mecatrónicos avanzados y en otras IES se identifican programas de ingeniería mecatrónica orientados al diseño mecatrónico de productos.

C. Educación en Colombia

En Colombia, la mecatrónica como programa de educación superior se inicia en 1996 en Cali, Valle del Cauca. Porque se demuestra la necesidad de avanzar en la formación de profesionales que lideren procesos de diseño y desarrollo de equipos y maquinaria multidisciplinarios para fabricación automática, aumentar la productividad, y capacitar profesionales con perfil científico y tecnológico para manejar conceptos de diseño mecatrónico, control, automatización y modelaje por computador. Ahora, se destacan los siguientes desarrollos académicos consolidados en mecatrónica: una maestría en ingeniería mecatrónica, una maestría en mecatrónica y control, cuatro especializaciones en mecatrónica, 18 programas de ingeniería mecatrónica, 10 tecnologías en mecatrónica y cinco técnicas en mecatrónica. En las maestrías en mecatrónica se identifican los siguientes perfiles profesionales de profundización; diseño de sistemas mecatrónicos, control y automática. La ingeniería mecatrónica está clasificada como una de las trece carreras profesionales de más demanda, según el Observatorio Laboral del Ministerio de Educación Nacional y es la ingeniería que más ha crecido en número de programas y demanda estudiantil desde 1996. Diseño curricular y perfiles profesionales en educación en mecatrónica en Colombia se muestra en la Tabla 2.

Áreas	Frec	%
Diseño mecatrónico	12	72
Robótica	8	48
Manufactura	5	28
Manufactura Avanzada	4	22
Automatización industrial	0	0
Industria militar	0	0
Industria automotriz	0	0
Automatización y control	0	0

Tabla 2. Diseño curricular y perfiles en mecatrónica colombianos

D. Tendencia internacional en mecatrónica

La principal tendencia en educación en mecatrónica internacional es el **diseño mecatrónico** de productos y procesos; en donde la inteligencia artificial juega un rol muy importante porque permite el desarrollo de algoritmos, software inteligente y control inteligente para la creación de productos, máquinas y sistemas inteligentes. La segunda tendencia en educación en mecatrónica es el **control y automatización industrial** que permite la integración de tecnologías de base electrónica a los sistemas productivos tradicionales para realizar control y automatización electrónicos de las funciones en las plantas industriales. El control y la automatización industrial se caracterizan por la integración de los computadores digitales de manera intensiva y extensiva a las funciones de la fábrica, como manejo de materiales, diseño, procesamiento, ensamblaje, control de calidad y control automático. Cuando se integran los computadores digitales a funciones de gestión y administración de la compañía, entonces se destaca manufactura integrada por computador CIM. La tercera tendencia de la educación en mecatrónica internacional es el desarrollo de la **automatización robótica**, lo cual significa el uso intensivo y extensivo de robots industriales y de robots de servicio. Los primeros aplicados en los sectores productivos industriales, agroindustriales, alimentarios, agrarios y pecuarios. Y los segundos aplicados en el hogar, la medicina, la asistencia a discapacitados, y servicios en general.

E. Diseño curricular transdisciplinario

Los programas de educación superior mono disciplinarios son la fragmentación y organización de la enseñanza por áreas del conocimiento diferenciadas como ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica electrónica e ingeniería informática. Este enfoque mono disciplinario de educación en mecatrónica transfiere al estudiante la responsabilidad de construir, organizar e integrar los conocimientos disciplinarios durante su proceso de aprendizaje, no le permite la comprensión y relación de los conocimientos entre sí, le impide tener una visión más integral para construir saberes en función de la totalidad, propendiendo a formar egresados poco creativos. De ahí su dificultad para aplicar la mecatrónica.

Los pedagogos han tratado de manera prolija los conceptos de diseño curricular disciplinario, multidisciplinario, pluridisciplinario, interdisciplinario y transdisciplinario [22] [23] [24] [25]. Los principales abordajes del diseño curricular han sido realizados desde las perspectivas disciplinaria, multidisciplinaria e interdisciplinaria, pero con el cambio de paradigmas debido al desarrollo de las tecnologías y de las ciencias hacia la convergencia se hace necesaria la descripción de las principales características del diseño transdisciplinario. El modelo curricular interdisciplinario considera un conjunto de disciplinas organizadas en dos niveles en donde una de las disciplinas es la que posee el mayor nivel jerárquico, así,

neurobiología, psicopedagogía y bioquímica. En mecatrónica, la mecánica es la disciplina de mayor jerarquía en este enfoque interdisciplinario. La transdisciplinariedad busca que las relaciones entre las disciplinas trasciendan en la integración, bajo el supuesto de unidad entre diversas disciplinas que le permitan interpretar la realidad y los fenómenos que se presuponen unitarios. El término *trans* implica “cruzar”, “atravesar”, “estar entre”, “ir más allá”, “trascender a”. La transdisciplina no es una nueva disciplina, es una forma de hacer dialogar las disciplinas, borrando los rígidos límites que marcan separación entre las fronteras del conocimiento, permite una relación más incluyente, más tolerante, permite la evolución o extensión de una disciplina hacia otras disciplinas, es decir, permite su expansión consciente de tal suerte que en la interacción se obtenga una síntesis adecuada a la complejidad del objeto de estudio.

La educación en mecatrónica [26] [27] es transdisciplinar, es moderna desde la teoría hasta su aplicación y desde su acción hasta su interacción; es internacional por su diseño curricular; orientada hacia las tecnologías de punta que desarrollan a las modernas industrias; pertinente al desarrollo, innovación y evolución de las tecnologías avanzadas y caracterizada por el diseño mecatrónico que supera el diseño tradicional de productos de ingeniería, por su sinergia y por la necesidad de competencias complementarias respecto a las ingenierías tradicionales. El diseño mecatrónico evoluciona hacia la creatividad y optimización funcional, amplitud conceptual, orientación interdisciplinar, manejo de incertidumbres, y también por pensar y trabajar en equipo multidisciplinar. Origina el diseño concurrente y la ingeniería concurrente, también conocidos, ahora, como diseño convergente e ingeniería convergente.

IV. APLICACIÓN

A. Objeto de estudio

Ingeniería mecatrónica en la IES es un programa interdisciplinario y transdisciplinario que se ocupa del estudio de la física, de las matemáticas, de la biología y de la química orgánica aplicadas a los sistemas mecánicos, eléctricos, industriales y humanos, para proyectar, diseñar, instalar y mantener, sistemas mecatrónicos, a través de una formación integral en las áreas de (1) automatización robótica para sistemas productivos y (2) Automatización robótica para medicina (Biomecatrónica). Igualmente, la administración y gestión de proyectos y de tecnologías pertinentes a estas áreas, mediante el aprovechamiento de los recursos naturales en el marco de la responsabilidad social, la ética, la bioética y el respeto al medio ambiente. Es un programa transdisciplinario que se integra con los programas de la facultad de ingeniería y con los programas de la facultad de ciencias de la salud, con orientación de los

centros de investigaciones institucionales para el desarrollo de proyectos de investigación multidisciplinarios y transdisciplinarios.



Figura 1. Ingeniería mecatrónica integrada en IES

B. Diseño curricular transdisciplinario

Los aspectos básicos para el diseño curricular transdisciplinario en ingeniería mecatrónica de la IES considera el modelo Iberoamericano [28] que aproxima los modelos curriculares de Argentina, Brasil, Colombia, Chile, España, México, Perú, Portugal, Uruguay y Venezuela; con diferentes componentes académicos e indicadores. Con base en esta orientación ingeniería mecatrónica integra los fundamentos de ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica electrónica e ingeniería informática hacia la obtención de una función transdisciplinar expresada en diseño mecatrónico de un producto.

Este diseño curricular transdisciplinario está compuesto por cinco áreas del conocimiento: área de ciencias básicas como fundamento científico, área de fundamentos básicos de ingeniería mecánica, eléctrica electrónica e informática, área de ingeniería mecánica, eléctrica electrónica e informática aplicadas hacia la integración, área interdisciplinaria y transdisciplinaria en las dos líneas de profundización del programa y área complementaria o socio humanista. Cada área del programa representa el 20% de los créditos académicos. Los contenidos curriculares se desarrollan a través de las siguientes asignaturas:

Área de ciencias básicas: Álgebra lineal, Cálculo diferencial, Cálculo integral, Cálculo vectorial, Ecuaciones diferenciales, Física mecánica, Física electromagnética, Física óptica y ondas, Probabilidad y estadística, Matemáticas avanzadas, Biología y Química orgánica.

Área de fundamentos básicos de ingeniería mecánica, eléctrica electrónica e informática: Orientación a ingeniería mecatrónica, Ingeniería mecánica (Dibujo técnico mecánico, Principios de metrología, Estática y Dinámica, Ciencia de los materiales), Ingeniería eléctrica electrónica (Circuitos eléctricos, Electrónica analógica, Electrónica digital, Diseño de sistemas electrónicos), Ingeniería informática (Lógica de programación, Software para ingeniería, Lenguajes de programación), Investigación interdisciplinaria y transdisciplinaria (Fundamentos y Estrategias).

Área de ingeniería mecánica, eléctrica electrónica e informática aplicadas hacia la integración: Ingeniería mecánica (Mecánica de sólidos, Mecanismos, Elementos de máquinas, Procesos de fabricación mecánicos, Mecánica de fluidos, Termodinámica, Transferencia de calor y masa), Ingeniería eléctrica electrónica (Análisis de señales y sistemas, Sistemas digitales avanzados, Electrónica industrial y de potencia, Sistemas de control, Control digital), Investigación interdisciplinaria y transdisciplinaria (Cualitativa y Cuantitativa).

Área interdisciplinaria y transdisciplinaria en las dos líneas de profundización del programa: Diseño mecatrónico (Diseño mecánico y Diseño eléctrico electrónico integrados), Automatización, Robótica industrial, Robótica de servicio, Actuadores-sensores-transductores, Anatomía y fisiología humana, Exoesqueletos-prótesis-ótesis antropomórficas, Electiva I, Electiva II, Electiva III, Investigación transdisciplinaria (Propuesta y Desarrollo de Trabajo de Grado).

Área complementaria o socio humanista: La IES organiza esta área académica con base en su perfil institucional. En Colombia existen tres tipos de universidades: Universidades públicas, Universidades privadas de orientación religiosa y Universidades privadas de orientación laica, que marcan el perfil profesional de cada Institución.

La competencia profesional principal a desarrollar es diseñar sistemas mecatrónicos a través de niveles de formación en cada una de las áreas curriculares, fundamentación científica, fundamentación disciplinar, integración disciplinar, formación transdisciplinar en mecatrónica y proyecto de grado.

Área	CA	%	Disciplinas
Ciencias básicas	36	20	12
Básicas ingeniería	38	21	16
Ingeniería aplicada	40	22	14
Profundización	34	19	12
Socio humanista	31	18	17
TOTAL	179	100	71

Tabla 3. Diseño curricular transdisciplinario en ingeniería mecatrónica con base en el modelo Iberoamericano.

C. Pertinencia del programa

Académica. En laboratorio de mecatrónica de Universidad Nacional de Colombia UNAL se han desarrollado proyectos de investigación como trabajos de graduación y pos graduación en: prototipado rápido, NC, CNC, CMM, Robótica industrial, Sistemas de manufactura flexible, automatización industrial. En prospectiva tecnológica se tienen proyectos con el sector madera, sector cuero, sector

empaques de alimentos, sector plásticos y sector metal mecánico. En apropiación de nuevas tecnologías hay transferencia en prototipado rápido, servomecanismos, automatización, reconversión de máquinas herramientas. También, integración académica y científica entre el laboratorio de mecatrónica y similares laboratorios en el mundo usando su infraestructura de Internet avanzada RENATA [29]... [40]. La educación en graduación y pos graduación en mecatrónica en Colombia son una respuesta al perfil del ingeniero del año 2020 [41] [42]. Charles West [43] afirma que, es importante pensar y re pensar la educación actual de la ingeniería por la integración de nuevas necesidades derivadas de los desarrollos tecnológicos, como: computación digital, telefonía celular, automatización, robotización, nanotecnologías, genoma humano, entre algunas. La ONU [44] proyecta que, las ingenierías del presente y del futuro deben considerar el desarrollo humano integral y sustentable DHIS para salvar el globo terráqueo. La mecatrónica maneja tecnologías limpias de base electrónica.

Investigativa. En Colombia, se registran más grupos de investigación en control y automatización y robótica, y la investigación científica y tecnológica está centrada en la automatización, robótica y comunicaciones [45], [46], [47]. En la Costa Caribe colombiana (Atlántico, Bolívar, Magdalena) y en el eje cafetero (Caldas, Risaralda y Quindío) el 24.86% de las fábricas utilizan el computador digital para alguna función de apoyo. La manufactura es mecanizada en 98.57%. Y se identifican las siguientes necesidades de capacitación: (1) Automatización industrial. (2) Gestión tecnológica. (3) Sistemas de manufactura. (4) Sistemas CAD / CAM. (5) Sistemas mecatrónicos [48] [49]. En el nordeste colombiano [50] identifican las áreas de conocimiento donde se necesita más capacitación: automatización y control 31%, diseño mecatrónico 28%, robótica 24% e investigación 17%. Ver Figura 2. Los temas más importantes donde se requiere profundizar son: inteligencia artificial 52%, integración de tecnologías 49%, sistemas automáticos de producción 47%, modelaje y simulación 42%. Ver Figura 3. La aplicación de sistemas mecatrónicos en ingeniería biomédica, está por desarrollar en Colombia, pero se verifican significativos progresos a nivel internacional [51], [52], [53], [54], [55].

Proyección social. La evolución de industrias internacionales muestra [56] que las tecnologías de base microelectrónica, las tecnologías de administración y organización empresarial, y el desarrollo científico y tecnológico permiten el acceso a mayor competitividad y eficiencia industrial. Con este referente, a nivel nacional colombiano se verifica la incorporación de máquinas herramientas CNC y sistemas CAD / CAM en la industria colombiana, formas digitalizadas de organización del trabajo ERP (Enterprise Resource Planning) y Sistemas Automatizados de Producción SAP para minimizar pérdidas de tiempo y costos, y a desarrollar nuevos productos y servicios. Gabriel Poveda profesor emérito colombiano [57] manifiesta que haber dependido totalmente del exterior, renunciando del todo a hacer desarrollos tecnológicos propios, le ha acarreado a la industria y al país grandes desventajas. Según publicaciones de MIT e IEEE

[58] [59] [60] [61] las siguientes son las tecnologías que cambiarán el mundo: (1) Microsistemas que requieran sistemas de control a bajos costos y tamaño reducido. (2) Integración mecánica y electrónica en sistemas mecatrónicos, provisto de hardware y software que garantice la operación óptima de estos sistemas. (3) Aplicaciones de la robótica en medicina, o sea, biomecatrónica.

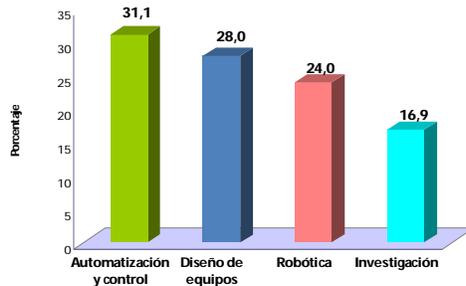


Figura 2. Áreas de educación en mecatrónica



Figura 3. Tópicos de educación en mecatrónica

V. CONCLUSIÓN

El diseño mecatrónico es multidisciplinar porque involucra varias disciplinas, interdisciplinar porque hay interacción disciplinar y transdisciplinar porque va más allá de cada una de las disciplinas integradas. El diseño curricular en mecatrónica se distingue porque: el diseño mecatrónico es de base mecánica, el diseño mecatrónico es un proceso complejo en donde las partes interactúan para lograr su función específica, el objetivo del diseño mecatrónico es encontrar la solución óptima o cerca de la óptima para que sea competitiva, el diseño mecatrónico es un trabajo de grupo multidisciplinario, el diseño mecatrónico es una combinación de ciencia y arte, la educación en mecatrónica es compleja, interdisciplinaria y transdisciplinaria.

Este artículo es producto del diseño curricular de un programa en ingeniería mecatrónica y del diseño curricular de un programa de maestría en ingeniería mecatrónica, en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] Carvajal Rojas J.H., et al. Diseño mecatrónico y desarrollo de prototipo de máquina reprogramable y flexible para dibujo en 2D. Revista ITECKNE, Vol 7, No 2. 2010. ISSN 1692 – 1798
- [2] Carvajal Rojas J.H., et al. Diseño Mecatrónico de Robot Móvil para Transporte de Carga en superficies Irregulares. Revista ITECKNE, Vol 7, No 1. 2010. ISSN 1692 - 1798
- [3] Coelho M.A.O., et al. A Use-Centred Mechatronics Design Method. Mechatronic 2008, 11th Mechatronics Forum Biennial International Conference. University of Limerick, Ireland.
- [4] Ortiz Sanchez - Navarro D., et al. Mechatronics methodology applied to design and control of a mobile robot. 4th Latin America IEEE Robotic Symposium and IX Mexican Robotic Congreso. Asociación Mexicana de Robótica A.C. – Robotics and Automation Society IEEE, Universidad de Monterrey, Nuevo León, México. November 8-9, 2007.
- [5] Yasunori Takemura, Amir A. F. Nassiraei and Kazuo Ishii. Concept of mechatronics modular design for an autonomous mobile soccer robot. International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA 2007.
- [6] Carvajal Rojas J.H., et al. Mechatronic design of a teleoperate robotized vehicle for exploring and security. 23rd ISPE CARS & FOF 2007. Bogotá, Colombia. ISBN 9789589785973
- [7] Christian Koch, et al. Project course design of mechatronics System. ICM 2006.
- [8] Luciano Chiang Sánchez. Diseño conceptual. Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica. Universidad Católica de Chile. 2003.
- [9] Carvajal Rojas, J.H. Metodología de diseño mecatrónico de robots. ÉPSILON N°. 6, Bogotá, Colombia. 2006. ISBN 1692-1259
- [10] W. X. Xu and G. Bright. Massey Mechatronics - Designing intelligent machines. International Journal of Engineering Education, 2002.
- [11] Zbigniew Mrozek. Computer Aided design of mechatronic systems. Applied Mathematics and Computer Science, 2003, Vol 13, No. 2.
- [12] Devdas Shetty and Richard A. Kolk. Mechatronics System Design. Cengage Learning, 2010. 504 páginas. ISBN 1439061998, 9781439061992
- [13] Devdas Shetty, et al. Real time mechatronic design for research and education. Proceeding of the 2002 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition Copyright.
- [14] Jindong Liu, Ian Dukes, Huosheng Hu. Novel mechatronics design for a robotic fish. 2001 IEEE RSJ International Conference on Robots and System.
- [15] Hendrik Jan Coelinhg. Design Support Motion Control System: a mechatronic approach. Ph. D. Thesis. Twenty University, Holland, 2001.

- [16] Van Amerongen Job. Modelling, Simulation and Controller Design for Mechatronic Systems with 20-sim 3.0. Cornelis J. Drebbel Research Institute for Systems Engineering and Control Laboratory, Electrical Engineering Department, University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, Netherlands, 2001.
- [17] Carvajal Rojas, J. H. Robótica: aproximación al diseño mecatrónico. Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, Octubre 2000. ISBN 958-33-3785279
- [18] Broenink J.F. et al. Computer Aided Design of mechatronics Systems using 20 – sim 3.0. Proceedings of WESIC'99, Newport (S. Wales), UK, 1999
- [19] Rolf Isermann. Modeling and design methodology for mechatronics systems. IEEE/ASME Transactions of Mechatronics, Vol 1, No. 1, March 1996.
- [20] Venuvinod Patri and Reddy Narasimha. Trends in Mechatronic Engineering and Education. PNR 2002. University of Hong Kong.
- [21] Mandenius Carl-Fredrik and Bjorkman Mats. Biomechatronic Design in Biothecology. John Wiley and Sons 2011. ISBN 978-0-470-57334-1
- [22] María Elina Leal Pastene. El reto de la transdisciplina. Septiembre 06 de 2010.
<http://es.slideshare.net/mariaelinal/el-reto-de-la-transdisciplinariedad>
- [23] Mario Tamayo Tamayo. El proceso de la investigación científica. Limusa Noriega Editores. Bogotá 2009. ISBN 968 18 5872 7
- [24] Nicolescu, B. Transdisciplinarity and Complexity: Levels of Reality as Source of Indeterminacy. Centre International de Recherches et etudes transdisciplinaires. 2000.
<http://ciret-transdisciplinarity.org>
- [25] Olivia Fragoso Susunaga. El giro del diseño: transdisciplina y complejidad. Revista del centro de investigación. Vol. 8, Núm. 31, enero-junio, 2009, pp. 97-107. Universidad La Salle, México. ISSN: 1405-6690
- [26] Grimheden Marim. Mechatronic Engineering Education. Doctoral Thesis. KTH Industrial Engineering and Management. Stockholm, Sweden 2006. ISBN 91-7178-213-3
- [27] Carvajal Rojas, J.H. Automatización electrónica y mecatrónica en la educación. Memorias de la XXV Reunión Nacional de Facultades de Ingeniería. Cartagena, Colombia, 2005. ISSN 1900- 8260.
- [28] Asibeí. Aspectos básicos para el diseño curricular en ingeniería: caso Iberoamericano. Bogotá, Colombia, 2007. ISBN 978-958-44-206-8
- [29] Córdoba Nieto E. (compilador). Automatización y repotenciación tecnológica del proceso industrial del control de calidad de engranajes. UNAL, Bogotá. 2010. Páginas: 201. ISBN: 9789587191240.
- [30] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Accesibilidad a la celda de manufactura flexible del laboratorio de mecatrónica a través de la red académica de tecnología avanzada RENATA. IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y II de Ingeniería Mecatrónica. Bogotá, Colombia.
- [31] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Design and implementation of a pilot test for an industrial prototype of Harmonic Drive using a FPGA Real-Time system. COBEM 2009 20Th. Brazil, 2009.
- [32] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Digitalización de engranajes cilíndricos en la CMM experimental con plataforma de Labview. CIMM 2006 Tercer Congreso de Ingeniería Mecánica y Primero de Mecatrónica. Bogotá, Colombia, 2006.
- [33] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Interconexión y supervisión remota por medio de Internet de una celda de manufactura flexible. Cibim8, Ediciones Pontificia Universidad Católica Del Perú. 2007.
- [34] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Máquina CNC Experimental con Arquitectura Paralela. Cibim8, Ediciones Pontificia Universidad Católica Del Perú. 2007.
- [35] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Reconversión Máquina Medidora de Engranajes a Tecnología CNC. Cibim8, Ediciones Pontificia Universidad Católica Del Perú. 2007.
- [36] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Máquina CNC Experimental con Arquitectura Paralela 3DOF. VII Congreso de la Asociación Colombiana de Automática. Cali, Colombia 2007.
- [37] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Mechatronics modules for gear generation by CNC. 13th ISPE/IEE International conference on CAD/CAM, Robotics and FOF 1997.
- [38] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Monitoreo y supervisión por medio de internet de una celda de manufactura flexible. VII Congreso de la Asociación Colombiana de Automática. Cali, Colombia 2007.
- [39] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Prototipado Rápido por Extrusión de una Pasta Cerámica en un Proceso Similar al usado en Prototipado por FDM. Cibim8, Ediciones Pontificia Universidad Católica Del Perú. 2007.
- [40] Córdoba Nieto E. y Colaboradores. Trajectory Generation Control in the PKMR Machine-Robot of Orthoglide Type. CARS & FOF 07 - 23 ISPE
- [41] Acofi. Retos en la formación del ingeniero para el año 2020. Bogotá, Colombia, 2006.
- [42] Acofi. XXVI Reunión Nacional de Facultades de Ingeniería. Cartagena, Colombia 2006.
- [43] Charles West. Brunel Lecture Series on Complex Systems, MIT Engineering Systems Division, Educating Engineers for 2020 and Beyond. 2008.
- [44] Onu. División de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, Departamento de Información Pública de las Naciones Unidas, 2005.
- [45] Colciencias, Sena y Unal. Dispositivos modulares CNC: una oferta tecnológica para la industria. Universidad Nacional de Colombia UNIBIBLOS Sección imprenta, Bogotá, Colombia, 1998.
- [46] Colciencias. Líneas de investigación y número de grupos. Bogotá, Colombia 2006.

- [47] Colciencias. Plan estratégico para el sector productivo colombiano y tendencias de los procesos de manufactura en Colombia 2005 – 2015. Bogotá, Colombia, 2005.
- [48] Carvajal Rojas, J.H. Estado del arte de las tecnologías de manufactura y automatización en la industria de las provincias de Caldas, Risaralda y Quindío y tendencias de desarrollo. Informe, Universidad del Quindío y Gobernación del Quindío, Armenia, Colombia, 2003.
- [49] Carvajal Rojas, J.H., et al. Estado del arte de las tecnologías de manufactura y automatización en la industria de la Costa Atlántica y tendencias de desarrollo. Segundo Congreso Colombiano de Ingeniería Mecánica y primero de Ingeniería Mecatrónica, UNAL, Bogotá, Colombia, 2001.
- [50] Javier Camilo Lizcano S. Estudio de Mercado de la Mecatrónica en Nordeste Colombiano. Bucaramanga y área metropolitana, Barrancabermeja, San Gil, Cúcuta, Pamplona, Valledupar y Tunja. 2009.
- [51] Claude Lagoda, Juan C. Moreno, and José Luis Pons. Human – robot interfaces in exoskeletons for gait training after stroke: State of the art and challenges. *Applied Bionics and Biomechanics* 9(2012)
- [52] Iñaki Días, Jorge Juan Gil and Emilio Sánchez. Lower limb robotic rehabilitation: literature review and challenges. *Journal of Robotics*, Volume 2011.
- [53] José L Pons. Rehabilitation, Exoskeletal Robotics. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. May/June 2010.
- [54] Robert Bogue. Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments. *Industrial Robot: An International Journal* 36/5 (2009)
- [55] Samer Mohammed and Yacine Amirat. Towards Intelligent Lower Limb Wearable Robots: Challenges and Perspectives - State of the Art. *International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Thailand, February 21 - 26, 2009.
- [56] Tecnos, Fedemetal, Fundación NCI. La automatización programable en la metalmecánica colombiana. Bogotá 1990. ISSN 958-9180-20-5
- [57] Gabriel Poveda. Tecnología y Desarrollo Industrial Colombia 1960 – 1995. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Antioquia, Colombia. 1995.
- [58] IEEE. Visión global de los países desarrollados sobre las tecnologías de mayor impacto para los años siguientes, en su orden: Ingeniería Biomolecular, Nanotecnología, Mega computación y Robótica. 2004.
- [59] MIT Technology Review 2001.
- [60] Richard K. Ulrich and William D. Brown (Editors). *Advanced Electronics Packaging*. Wiley IEEE Press, 2006, 840 Pages. ISBN 978-0-471-46609-3
- [61] Terry J. Van der Werff, CMC. 10 Emerging Technologies That Will Change the World. MIT Technology Review 2001.