

# Complejidad y Pensamiento Complejo para innovar los procesos formativos en ingeniería

Edgar SERNA M.

and

Alexei SERNA A.

Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Corporación Universitaria Remington  
edgar.serna; alexei.serna (@uniremington.edu.co)

## RESUMEN

En este artículo se propone la integración de nuevos términos y principios en la construcción de planes de estudios y contenidos de los programas de ingeniería, con el objetivo de innovar la formación, para que los ingenieros gestionen el conocimiento y lo utilicen en la solución de problemas. La propuesta consiste de tres aspectos centrales: 1) dejar de lado el pensamiento lineal y comenzar a ver el mundo de forma holística, 2) formar desde la transdisciplina para el desarrollo de la creatividad, y 3) integrar al Pensamiento Complejo en la formación ingenieril como principio de innovación y de análisis. Se trata de una apuesta para mejorar la impresión que la sociedad tiene de la ingeniería, porque es una de las profesiones que más llama la atención y porque últimamente no hemos hecho mucho por recobrar el protagonismo que tenía en años anteriores.

**Palabras clave:** Transdisciplina; Pensamiento Complejo; formación; innovación.

## 1. INTRODUCCIÓN

Por siglos, la invención, la creación y la innovación en ingeniería hicieron posible el desarrollo de la humanidad, y sus aportes son innumerables para el beneficio del ser humano. La creatividad en esta profesión la han puesto a la vanguardia de una vasta gama de innovaciones que han cambiado el mundo, tales como los motores, la medicina, la conquista espacial y la internet, por mencionar algunos. Sin embargo, en los últimos años la economía despertó un creciente interés por el rendimiento financiero a corto plazo, lo que llevó a la industria a centrarse principalmente en la llamada *innovación incremental*, es decir, a desarrollar productos para la próxima generación con base en la retroalimentación de las necesidades del usuario actual. Paralelamente, las universidades han seguido esta tendencia y estructuraron e implementaron un enfoque para formar ingenieros que desarrollen este tipo de innovaciones.

Innovación, desarrollo, creatividad e internacionalización son términos que se relacionan desde hace tiempo con la ingeniería y que, en este siglo, con el incremento de la complejidad de los problemas que esta profesión debe resolver, tienen más vigencia que nunca antes. Los ingenieros de hoy deben pensar, analizar, razonar y actuar de forma diferente a sus predecesores, porque los cambios y las revoluciones en el conocimiento lo exigen y porque la sociedad espera mucho más de ellos. Este es el verdadero reto de las facultades de ingeniería: innovar los procesos formativos para que sus profesionales desarrollen

creatividad y ofrezcan soluciones eficientes y eficaces, que permitan el desarrollo y la internacionalización del país. Pero si continuamos trabajando como en el siglo XX no se podrá superar este desafío, porque el contexto, el mundo, las necesidades, las exigencias, los retos y los estudiantes han cambiado. Se necesita una nueva forma de pensar y actuar acerca de la formación de los ingenieros de hoy y del futuro cercano.

La innovación incremental consiste de una serie de pequeñas mejoras a un producto o línea de productos existentes que, normalmente, ayudan a mantener o mejorar su posición competitiva en el tiempo. Regularmente se utiliza en el sector de alta tecnología por empresas que necesitan optimizar sus productos mediante la inclusión de las nuevas características que desean los consumidores. Es decir, no se trata de cambios radicales sino de hacer un poco cada vez, de tal manera que se puede observar como una reducción de costos o de características en los productos o servicios existentes [1]. La razón es simple: se reduce el riesgo, porque cuando una empresa desarrolla un producto y lo tiene posicionado tiende a acumular capital humano capacitado que puede modificarlo cada vez que lo crea conveniente. De esta forma su objetivo es *mejorarlo* continuamente para cumplir con las demandas del mercado: 1) que sea relevante para el consumidor, 2) que sea más competitivo, y 3) que se reduzcan los costos.

Sin embargo, muchos reconocen que este tipo de innovación no es suficiente para solucionar los grandes desafíos que enfrenta no solamente la industria sino la sociedad en general [2, 3], tales como la energía sostenible, la reducción de la contaminación, la estabilidad económica, la igualdad y la atención en salud, entre muchos otros. Estos desafíos son grandes, complejos y transnacionales, por lo que la industria sola no está capacitada para enfrentarlos y se requiere un trabajo mancomunado entre los gobiernos, la industria y la academia para lograr soluciones eficientes y eficaces [4]. Los gobiernos deben financiar el trabajo de la industria que posee la infraestructura, pero la academia está obligada a formar a los ingenieros para que piensen de forma holística, comprendan los problemas y estructuren soluciones. Pero, así como se están capacitando actualmente no podrán atender estas demandas, porque tienen visión lineal y solamente ven una parte del mundo, cuando los problemas son transdisciplinarios y complejos. Por eso es necesario innovar los procesos formativos, por ejemplo, integrando el paradigma del Pensamiento Complejo en los programas ingenieriles, estructurando planes de estudios transdisciplinarios y desarrollando el razonamiento lógico y holístico de los estudiantes. De esta forma sería posible que los futuros ingenieros incentiven a la industria a abandonar la innovación

incremental para centrarse en la *innovación radical*. Esta innovación tiene impacto significativo en el mercado y en la actividad económica de las empresas, porque se centra en el valor de las innovaciones en oposición a su novedad. Debido a que la humanidad no puede seguir pensando a corto plazo acerca de su supervivencia y, si el objetivo es mantener la especie, es el momento de formar a los ingenieros que puedan lograrlo [5].

En el núcleo de la mayoría de innovaciones que se llevan a cabo en la industria siempre se encuentra una nueva tecnología o una nueva aplicación de alguna existente. Esto pone a la ingeniería en el centro de cada innovación, porque sus profesionales se han formado y tienen una capacidad establecida para entregar innovaciones incrementales. Pero el mundo de hoy necesita innovaciones radicales, por lo que es necesario formarlos para que desarrollen nuevas habilidades y para que gestionen de otra manera el conocimiento existente. Por eso es que en este artículo se sostiene el principio de que, si esta es la meta, es necesario realizar cambios en la forma como se capacita a los ingenieros. Debido a que persiste confusión y malentendidos acerca de lo que es innovación, en el contenido se presenta una definición y se explican los diferentes tipos. Se describe un marco para integrar la Transdisciplina y el Pensamiento Complejo en los programas, como alternativa para capacitar profesionales que desarrollen innovación radical.

## 2. INGENIERÍA, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN

Tal y como se viene desarrollando la humanidad, las innovaciones de mañana necesitarán ingenieros capacitados para entender y comprender a fondo cómo aplicar sus conocimientos y habilidades para diseñar productos y procesos que no han existido antes [6, 7]. Esto se debe a la continua solicitud por actualizaciones que caracteriza a la sociedad en general y a la profesión de la ingeniería en particular y que han impulsado la creación y acreditación de programas de ingeniería que, muchas veces, ni siquiera tienen un perfil claramente definido. Por eso es común encontrar propuestas de reformas a la educación y a los enfoques pedagógicos en ingeniería, que casi siempre responden al programa del gobierno de turno y no a una política de desarrollo a largo plazo. Entonces, el resultado es una especie de moda pasajera que complica más el panorama de la formación en ingeniería y que no soluciona sus verdaderos problemas.

Hace más de dos décadas que en otras partes del mundo comprendieron que era necesario innovar la formación en ingeniería para responder a estas solicitudes y presiones [6, 8, 9], por lo que decidieron transformar las formas de enseñanza y modificar los contenidos para los futuros ingenieros [10]. Esto se debe a la evolución de la misma disciplina como un campo separado en el que surgen métodos de investigación y de formación para solucionar los problemas de la nueva sociedad [11], por lo que las universidades en general, y las facultades de ingeniería en particular, estructuraron programas de mejoramiento para fortalecer las habilidades pedagógicas y didácticas de los profesores, con el objetivo de atender las demandas de los estudiantes por conocimiento [12]. Por otro lado, la investigación se orientó a comprender y actualizar los procesos ingenieriles y a mejorar las prácticas en el aula [13, 14] mediante innovaciones sistemáticas en la transformación de los procesos, que influyeron directamente en las experiencias formativas de los estudiantes [15]. Para estas instituciones la innovación se convirtió en sinónimo de lo que *producen* a lo largo de un tiempo determinado, normalmente la duración de un programa como prototipo final [16], porque el desarrollo de la

tecnología y las demandas sociales las obligan a pensar en nuevas innovaciones para el siguiente.

Pero, a pesar de la actualidad del término innovación, todavía persiste cierta confusión sobre su definición, particularmente en lo que respecta al desarrollo de la ingeniería, la creatividad y la invención. En muchos escenarios se entiende a la invención y la creatividad como la generación de ideas y a la innovación como su despliegue en la práctica, es decir, es la explotación exitosa de las nuevas ideas. Además, también se asume que innovación es el proceso por el cual las nuevas ideas son explotadas con éxito para crear valor económico, social y ambiental [17]. Todo esto determina su importancia para hacerles frente a los desafíos complejos de la actualidad, porque la creatividad en ingeniería puede surgir como ideas para la invención de algo totalmente nuevo o como respuesta a las necesidades manifiestas de la humanidad, y esas ideas se convierten en la materia prima de la innovación. Por lo tanto, las invenciones son resultado de la creatividad, que pueden convertirse en innovación cuando se usan para desarrollar un nuevo producto o proceso que genere beneficios.

Por eso es que hay que formar a los ingenieros para que sean creativos y para que, mediante innovación, desarrollen ideas de invención para el cambio continuo y gradual de la sociedad. Pero deben ser sensibles a los problemas, las oportunidades o las tendencias sociales; mantener o mejorar la posición competitiva de la ingeniería y minimizar los riesgos para las empresas [18], porque no se trata de ser creativos para destruir la herencia y el conocimiento precedente. Por el contrario, aunque deben desafiar paradigmas, asumir riesgos moderadamente, ir más allá de posiciones competitivas y afectar positivamente la forma como funciona el mundo, su pensamiento creativo debe ser responsable desde lo económico, lo social y lo ambiental.

## 3. INNOVAR LA FORMACIÓN EN INGENIERÍA

El logro de este objetivo se debe abordar desde dos perspectivas principales: 1) considerar a la innovación como un mecanismo relacionado con los resultados de aprendizaje al final de un proceso de desarrollo, y 2) aplicar innovaciones curriculares como un mecanismo de cambio en el proceso de aprendizaje de los estudiantes. Esto obliga a las instituciones y a los profesores a considerar nuevos métodos, didácticas y prácticas, porque deben asumir al aprendizaje como la interpretación del *qué* (contenido) en relación con el *cómo* (contexto), lo que genera innovación en la forma como transmiten los objetivos de aprendizaje. Estas dos perspectivas se pueden alcanzar mediante la incorporación de tres aspectos centrales en los procesos formativos: 1) comenzar a ver el mundo de forma holística, 2) formar desde la transdisciplina para el desarrollo de la creatividad, y 3) integrar al Pensamiento Complejo como principio de innovación y de análisis.

### 3.1 Formación holística

A lo largo de los años el volumen del conocimiento descubierto y creado ha hecho inexorablemente que se deba fragmentar para su comprensión, y en ninguna disciplina esto es más palpable que en la ingeniería [19]. Porque desde hace más de un siglo se ha dividido en sub-campos, tales como militar, civil, eléctrica, mecánica y química, generando especializaciones dentro de los mismos. A la vez que la formación ha pasado a ser casi enteramente científica y técnica, dejando poco espacio para el aprendizaje de otras áreas relacionadas.

Mientras tanto, los desafíos que el mundo actual le presenta a la ingeniería son multidimensionales, no únicamente de carácter técnico, y muchas cuestiones ingenieriles interactúan estrechamente con la sociedad y lo público, por lo que el ingeniero debe tener pleno conocimiento de las dimensiones sociales y políticas para abordarlos. Algunos de estos desafíos son: suministro, conversión y almacenamiento de energía; pureza y conservación del agua; mitigación de la contaminación del aire, la tierra y el agua; calidad y cubrimiento de la atención en salud y educación; el calentamiento global y el aprovechamiento potencial de los nuevos descubrimientos para la agricultura, los alimentos y los medicamentos. Cuestiones que son complejas y para solucionarlas se deben conformar equipos integrados por profesionales desde una variedad de disciplinas, en los que cada miembro debe entender y comprender los conceptos y enfoques de los otros para llegar a conclusiones conjuntas [20]. A razón de la globalización de la economía y la sociedad la ingeniería se convirtió en una profesión universal, lo que obligó a estos profesionales a adquirir una buena comprensión de otras culturas. Pero los aspectos técnicos y estrechos, con los que se educa en ingeniería, han limitado la población que la considera atractiva.

Una manera de lograr el cambio necesario en la formación en ingeniería es abandonar el pensamiento lineal con el que se *educa* desde la Revolución Industrial y explorar las circunstancias y las necesidades de la educación y la práctica holística. La formación en ingeniería debe tener una base mucho más amplia de conocimientos, integrar la práctica y las necesidades e impactos sociales con los conceptos científicos subyacentes y facilitar puntos de entrada y salida para comunicarla y relacionarla con las dimensiones y disciplinas necesarias. Esto es a lo que se llama formación holística en ingeniería, pero para lograrlo es necesario cambiar actitudes y costumbres arraigadas en las personas y las instituciones. Por eso se necesita que la industria reconozca esta necesidad y la ubique como línea de desarrollo; que las asociaciones profesionales ofrezcan argumentos convincentes a las instituciones y al Estado; que los estudiantes reconozcan que es una buena inversión y un reto intelectual; que las facultades acepten que la multidimensionalidad de los desafíos actuales y futuros demandan mucho más de lo que ofrecen en los planes de estudios; y que la ingeniería como profesión reconozca que necesita el conocimiento y la sabiduría de otras disciplinas para comprender y solucionar los desafíos actuales le presenta la sociedad [21].

Muchos autores están convencidos y presentan casos convincentes de que el momento para lograr este cambio es ahora [2, 10, 20]. Pero, aunque se requerirá un esfuerzo coordinado entre diversas instituciones para llevarlo a cabo, en cada una se dará de diferentes formas y procedimientos. Subdividir más y más a la ingeniería en campos cada vez más estrechos no es la respuesta, se necesita un nuevo enfoque o tal vez una nueva definición de ingeniería como tal, porque tal vez tenga más relación con una forma de ver el mundo que con el dominio de la ciencia aplicada y las matemáticas. Ser ingeniero implica desarrollar y aplicar imaginación, experimentación, ingenio y mejoramiento iterativo, algo que no se puede lograr con los planes de estudio existentes, porque se han aislado en ramas lineales del conocimiento.

El enfoque holístico para la formación en ingeniería no es un concepto nuevo, pero en este siglo es más necesario que nunca antes, aunque requiere una visión amplia y profunda a través de

la ciencia, la ingeniería, las matemáticas, lo social y lo humano, así como la integración transdisciplinar a través de un enfoque sistémico. Pero, aunque diversas instituciones en el mundo han trabajado por decenios en el intento de formar ingenieros integrales, todavía hay mucho que aprender [22]. Los rápidos cambios en la economía global, la creciente preocupación por los problemas ambientales y energéticos y las transformaciones sociales que requieren tecnologías de la información, generan nuevas exigencias a la formación en ingeniería. Por eso es que los estudiantes deben alcanzar experiencia internacional, entender las implicaciones de la generación y el consumo de energía y ser hábiles con las herramientas computacionales. Además, deben desarrollar habilidades en liderazgo, comunicación y trabajo en equipo, capacitarse en lo técnico-científico de su área y comprometerse con la ética profesional. La forma de lograr todo esto es a través de procesos formativos holísticos.

### 3.2 Formación Transdisciplinar

La necesidad de evitar consecuencias negativas en las soluciones a los problemas nunca fue más difícil o importante de lo que es hoy, porque la población es numerosa y la tecnología, cada vez más compleja, se ha vuelto imprescindible en la experiencia humana. Por eso es que en este nuevo mundo se necesita un nuevo tipo de ingeniero, que piense en términos generales acerca de todas las disciplinas y que considere las dimensiones humanas involucradas en cada desafío [21]. En este nuevo orden no es suficiente un pensamiento estrecho, se requiere tener una visión transdisciplinar y multidimensional del mundo y de cada desafío para ofrecer soluciones eficientes, eficaces y seguras.

Desde un punto de vista pragmático los ingenieros deben ser sistemáticos y mantener el control intelectual sobre la expansión cada vez más amplia de la información y el conocimiento [23]. Por eso se deben formar en procesos de ingeniería integral, de tal manera que puedan superar las deficiencias de los fundamentos y los métodos de la ingeniería tradicional cartesiano-mecanicista, a través de la integración de disciplinas. Como resultado, se espera que los futuros ingenieros en este marco de integración desarrollen soluciones funcionales, teniendo en cuenta los aspectos económicos, ambientales y éticos de la conciencia humana. La forma de lograrlo es mediante planes de estudios transdisciplinarios, orientados a mejorar la calidad general de la investigación y la productividad para construir, mantener y gestionar la nueva generación de empresas y sus productos y servicios. La transdisciplina es una práctica que resulta de adquirir nuevo conocimiento a través de la educación, la investigación, el diseño y la producción, enfatizando en la resolución de problemas complejos [24]. El objetivo de esta formación es mejorar la comprensión que los estudiantes tienen acerca de los problemas complejos, mediante la compilación y aprovechamiento de los aspectos disciplinares involucrados, para generar soluciones integrales y holísticas.

La clásica metodología inter o multidisciplinar con la que se forma a los ingenieros combina las experiencias de dos o más disciplinas para abordar un tema de interés común, tratando de integrar datos, métodos, herramientas, conceptos y teorías separados con el fin de crear una visión holística [24, 25]. Pero esta manera de ver el mundo no es suficiente para comprender las cuestiones complejas de hoy y se necesita un cambio de enfoque, un marco general que trascienda el alcance limitado de esa visión a través de una síntesis general e integral de la información para generar conocimiento [26]. Esto se puede

lograr con la transdisciplina, porque incluye la cooperación de la comunidad científica y el debate social, transgrede las fronteras ingenieriles disciplinares e involucra la discusión sobre hechos, prácticas y valores, lo mismo que su impacto social [27]. Además, los profesores y contenidos deben promover la reorientación teórica, conceptual y metodológico con respecto a los conceptos básicos de las disciplinas involucradas en el problema [28]. De esta manera los estudiantes desarrollan su potencial creativo mediante colaboración transversal-integral, lo que les permite estructurar diversas maneras de resolver los problemas complejos; estarán capacitados para buscar colaboración por fuera de los límites de su disciplina y para integrar equipos que pretendan hacer nuevos descubrimientos, explorar diferentes perspectivas, expresar e intercambiar ideas y obtener nuevos conocimientos.

Obviamente, la formación en territorios y conchas disciplinares no responden a las exigencias de un mundo en constante integración tecnológica, en el que los problemas que debe resolver la ingeniería no se restringen a límites artificiales disciplinares. Puede ser que esta mentalidad fuera suficiente en la era anterior para resolver los principales problemas de la humanidad, pero los tiempos han cambiado y hoy no es suficiente una educación cartesiano-mecanicista masiva, porque sus egresados no responden a las demandas actuales. Esa manera de educar debe innovarse a través de una formación integral y combinatoria, que proporcione métodos y técnicas para obtener y gestionar el conocimiento necesario [8]. Las facultades de ingeniería deben responder a estos desafíos introduciendo la transdisciplina en los planes de estudios, reconociendo la existencia de disciplinas, de conexiones multidisciplinares, conectividad e interacción disciplinar y la necesidad de su fusión.

Aplicar un modelo transdisciplinar para la formación en ingeniería no quiere decir que se deban desmontar y desechar las disciplinas tradicionales, sino que las áreas de conocimiento, incluidas generalmente en cada una de ellas, se integrarán en una estructura transdisciplinar y que los límites entre las mismas serán mucho más suaves. Además, que los conceptos y el conocimiento de áreas tradicionalmente no-ingenieriles, tales como los negocios, la economía, la administración, la gestión humana, entre otras, se incluirán de forma más natural. De esta manera los ingenieros se formarán y capacitarán para crear, inventar e innovar cuando les hagan frente a problemas complejos que impliquen diversas cuestiones transdisciplinares.

### 3.3 Transdisciplina y Multidimensionalidad

Además, en este siglo los ingenieros integran sistemas para desarrollar artefactos y servicios funcionales, teniendo en cuenta aspectos económicos, ambientales y éticos de la conciencia humana, por lo que requieren un carácter transdisciplinar de diseño y utilización de procesos que resultaría valioso para mejorar su calidad, productividad, fiabilidad y seguridad general [29].

Un área de estudio particular se puede llamar disciplina, siempre que haya unificado sus herramientas, técnicas y métodos, y que posea una terminología estructurada. Tradicionalmente, las disciplinas se desarrollaron de forma independiente, con una marcada tendencia a minimizar la interacción con entidades externas u otras disciplinas. Cuanto más tiempo evolucionan más se encierran, sus practicantes desarrollan un nivel efectivo de comunicación intradisciplinar debido a su jerga, tienden a minimizar la comunicación interdisciplinar y desarrollan

territorios que se defienden con fiereza [30]. Obviamente, estos territorios disciplinares no están en sincronía con el trabajo que realizan los ingenieros, porque los problemas que deben resolver en la vida real no están restringidos a esos límites artificiales. En la era de la mentalidad cartesiana-mecanicista este enfoque sirvió para solucionar los principales problemas, sin embargo, los tiempos han cambiado. En este siglo los problemas son complicados y complejos, por lo que las soluciones requieren masivas infraestructuras de comunicación y de computación, donde se requieren equipos de trabajo cada vez más grandes. Pero una inadecuada comunicación interdisciplinar y las preocupaciones territoriales de sus integrantes, limitan la eficacia de su trabajo y, por tanto, de la calidad de sus soluciones [31].

En el trabajo ingenieril se aplica un modelo transdisciplinar para integrar y gestionar el conocimiento que los ingenieros necesitan para solucionar los problemas. Pero esto no significa que el trabajo disciplinar tradicional se deba desmontar completamente. Significa que las áreas de conocimiento, generalmente incluidas en cada una de las disciplinas, se deben presentar dentro de una estructura transdisciplinar de gestión de diseño y procesos, y que los límites entre ellas deberán ser mucho más suaves. Además, que los conceptos y los conocimientos de las áreas involucradas, tradicionalmente no-ingenieriles, se incluirán de forma mucho más natural [32, 33]. Así, los ingenieros responsables de estos equipos estarán mejor rodeados y en mejor posición de hacerle frente a la complejidad del problema.

Una característica inherente del modelo transdisciplinar es que todos los conocimientos, habilidades y destrezas de los ingenieros, tales como el análisis, la experimentación, la síntesis, el ingenio, la abstracción, la simulación y el modelado, se consideran herramientas útiles y necesarias, porque ofrecen lo necesario para comprender y solucionar el problema. En los sistemas las buenas soluciones deben engranar con las estructuras y organizaciones existentes y no como parches integrados [34]. La Transdisciplina permite una comprensión de cómo integrar sistemas a partir de componentes y subsistemas, de esta forma se ve al problema y su entorno desde una perspectiva más global. Por otro lado, la expansión del conocimiento y la complejidad de los problemas obligan a evaluarlos desde esa perspectiva transdisciplinar [35]. Por eso es que, como alternativa a la búsqueda de un ingeniero renacentista con todos los conocimientos necesarios, se requiere personas con experiencia en la temática y con capacidad para trabajar con eficacia dentro de un equipo transdisciplinar [36]. Por lo tanto, los líderes de proyectos deben asegurarse de atraer al mayor número de personas para trabajar con enfoques conceptuales orientados a la resolución, con pensamiento crítico y con creatividad. Estas personas deben ser entusiastas, creativas, inteligentes y aportar sus visiones para abordar el estudio del problema con una perspectiva transdisciplinar [37].

Un enfoque de este tipo involucra mayor cooperación e integración entre disciplinas, donde comparten métodos y temas para gestionar el conocimiento generado en cada proyecto [38]. Una ingeniería con esta visión presenta ventajas sobre los modelos tradicionales: la experiencia y el conocimiento del problema se comparten desde múltiples disciplinas; se tiene una visión del problema desde diferentes perspectivas; se diluye la ambigüedad del lenguaje natural; se logra fácilmente la formalidad; el diálogo se realiza en su propia jerga; la documentación es más explícita; las soluciones se discuten y analizan desde fuentes diversas y la utilización de recursos es más eficiente porque se dirigen directamente al foco de necesidad [39].

Por otra parte, la ingeniería es un proceso sistemático de descomposición y seguimiento a través de múltiples niveles de abstracción. Las estructuras resultantes son grafos dirigidos en los que las trayectorias de descomposición divergen y convergen, a medida que las posibles soluciones se re-factorizan a través de capas de diseño. En general, se espera esa divergencia porque cada fase del proyecto le añade detalles a ese diseño. Sin embargo, la convergencia se produce, por ejemplo, cada vez que una característica de diseño única satisface múltiples requisitos. Por eso es que en los problemas complejos convergen diferentes equipos para abordar cada capa del diseño, a la vez que analizar la descomposición de las necesidades asociados. Si el equipo no es transdisciplinar, la complejidad de toda la cadena de descomposición puede no ser evidente para un ingeniero individual. Por lo tanto, persiste la necesidad de trabajar transdisciplinariamente para mejorar la calidad de la solución final [40].

De acuerdo con Cronin [41], actualmente existe una necesidad latente por equipos de trabajo transdisciplinares en todos los campos, porque el conocimiento sobre los problemas socialmente relevantes es incierto, su naturaleza concreta se mantiene en abierta disputa y la humanidad tiene cada vez más en juego para su supervivencia. Los modelos transdisciplinares son eficientes para: 1) comprender la complejidad de los problemas, 2) tener en cuenta la diversidad de mundo y las percepciones científicas de los problemas, 3) resumir el enlace y el caso del conocimiento específico, y 3) constituyen conocimientos y prácticas que promueven lo que está concebido para el bien común. También promueven la reorientación teórica, conceptual y metodológica con respecto a los conceptos básicos de las disciplinas participantes [28]. El resultado esperado es un potencial creativo de disciplinas colaborativas y maneras de resolver problemas desafiantes. Este enfoque les enseña a los participantes a buscar la colaboración por fuera de los límites de su experiencia profesional, para descubrir información, explorar diferentes perspectivas, expresar e intercambiar ideas y obtener nuevo conocimiento.

Otra característica de los problemas ingenieriles es su origen multidimensional. Para Edgar Morin [42] y otros pensadores, la Multidimensionalidad permite una comprensión total del mundo, es decir, ayuda a desenmarañar la telaraña en que se confunde el conocimiento a medida que avanza el siglo XXI. Esto es posible porque hace una relación de todo lo que implica ese tejido, para lograr que los ingenieros, a través de procesos interpretativos, desarrollen una definición unívoca del mundo y para que asimilen al conocimiento como global [43]. Esto es importante porque en la actualidad se asume que la dificultad de pensar y vivir es una cuestión que no tiene retroceso, especialmente porque los desarrollos tecnológicos no facilitan esa conjunción.

La multidimensionalidad en ingeniería se basa en la dicotomía realidad-dimensión, en la que se considera que una dimensión está conformada por una jerarquía de niveles que representan diferentes detalles para estudiar las necesidades y que, un nivel, contiene los descriptores. Por otro lado, la realidad contiene la información que describe la necesidad desde los niveles de comprensión de las disciplinas involucradas. Al igual que Moody y Kortink [44], hay que considerar que una realidad puede contener varios y diferentes niveles de granularidad de la cadena datos-información-conocimiento. Por lo tanto, esa cadena representa las interpretaciones individuales de la granularidad de los datos sobre el mismo requerimiento. Específicamente, la realidad de estos está relacionada con un nivel de las dimensiones de análisis asociadas. Por último, una

realidad y varias dimensiones dan lugar a la comprensión unificada de la necesidad [45].

Este análisis e interpretación multidimensional de la ingeniería contribuye a satisfacerlas y, por lo general, se puede estimar y medir en términos de las múltiples dimensiones desde las cuales provienen [46]. Las implicaciones son: 1) a fin de comprender el verdadero valor y los impactos de una abstracción, se pueden cuantificar todas las dimensiones de rendimiento críticas del requerimiento; 2) el error de no estimar correctamente el impacto de cualquiera de ellos puede hacer que la labor ingenieril se invalide, o que no sea la prevista [47]; 3) al evaluar una solución ingenieril sobre la base de una o dos dimensiones, es casi seguro que hará falta información para comprender las consecuencias de una abstracción [48]; y 4) dada la baja probabilidad de que desde una dimensión se pueda obtener información confiable sobre los impactos de la solución, el equipo está obligado a hacer estimaciones de rendimiento, costos, implicaciones, cobertura, pruebas y seguridad, y tomar algunos riesgos al momento de la abstracción y el modelado. En la práctica, esto solamente se puede lograr una vez que dicha solución se atienda desde su multidimensionalidad [49].

### 3.4 Integrar Pensamiento Complejo

El siglo XXI es una época de grandes cambios, la sociedad cada vez es más global, el conocimiento se incrementa de forma exponencial y las tecnologías de la información y la comunicación evolucionan rápidamente. Vivimos en tiempos de desafíos y contradicciones, con una población humana que se incrementa y amenaza la sostenibilidad del planeta; una economía global basada en el conocimiento que exige nuevas habilidades y destrezas en los profesionales a través de fenómenos como la externalización y la deslocalización; gobiernos que basan su gestión en las fuerzas del mercado para reflejar las prioridades públicas; nuevos paradigmas como el software de código abierto, el conocimiento de contenido libre y una revolución en razonamiento que desafían la educación convencional; y tensiones geopolíticas cambiantes impulsadas por la disparidad en la distribución de la riqueza y el poder. Pero, al mismo tiempo, es un momento inusual de oportunidades y optimismo, porque los nuevos desarrollos no solamente mejoran la calidad de vida, sino que también permiten el surgimiento de nuevas formas de ver el mundo y de comprender la humanidad, con el objetivo de hacerles frente a sus necesidades.

Mientras luchamos con estos desafíos y tensiones, la preocupación para muchos es si las futuras generaciones se están equipando con el conocimiento y la perspectiva necesarios para afrontar lo que se viene [18]. Porque a medida que el mundo y sus problemas se vuelven más complejos también lo hacen las soluciones, los productos y sus implicaciones y ya no es suficiente pensar en soluciones simples e independientes, sino que hay que aplicar conceptos como interoperabilidad e integración de sistemas, una responsabilidad que recae directamente sobre los ingenieros. Pero, más allá de esa integración, tienen que ser pensadores creativos para visualizar el sistema de forma holística, de tal manera que puedan sobrepasar los requisitos y el uso previsto. Por eso requieren una formación más amplia, que les desarrolle un razonamiento lógico acorde con las exigencias del mundo y sus problemas, que les permita ubicarse en una realidad que todavía no han vivido pero que pueden crear mediante ingenio e innovación, es decir, necesitan desarrollar Pensamiento Complejo [22].

La educación en ingeniería tradicional desarrolla en los estudiantes un tipo de pensamiento en el que el conocimiento es

fragmentado, compartimentado, monodisciplinar y cuantificado, que conduce a una inteligencia ciega en la medida en que la capacidad humana para conectarlo se sacrifica a la aptitud menos normal para diferenciarlo. Morin [50] propone al Pensamiento Complejo como alternativa y como un paradigma para entender y comprender el proceso de conocer. Este tipo de pensamiento lo necesitan los ingenieros porque es el organizador de la información para representar el mundo y porque hace parte de sus razonamientos, ideas y creaciones, es decir, es una nueva mentalidad que les debe desarrollar su proceso formativo [51]. El concepto de mentalidad puede definirse como el conjunto de creencias, reflejos mentales y actitudes de comportamiento que comparten las personas. Dichas creencias varían de un grupo a otro en función de su cultura, formación y profesión.

Para Iryna Predborska [52], el Pensamiento Complejo: 1) es radical y se ubica en la raíz de los problemas; 2) es multidimensional; 3) es un sistema de pensamiento que analiza la correlación del todo y las partes; 4) es ecológico y no aísla los objetos en estudio, pero considera sus interrelaciones y sus conexiones ecológicas de autorregulación con el entorno cultural, social, económico, político y natural; 5) crea ecología de la acción y dialéctica de la acción, es decir, es capaz de construir una estrategia que permita modificar o incluso anular la acción emprendida por un sujeto; y 6) reconoce su propia imperfección y lleva a cabo las negociaciones con la duda, es decir, en la acción, porque no hay acción sin duda. Como paradigma, es una apuesta que deben asumir las facultades de ingeniería e introducirlo en los contenidos y estrategias prácticas para formar ingenieros.

Los estudiantes de ingeniería necesitan Pensamiento Complejo para desarrollar su capacidad lógico-interpretativa y abstractiva mediante razonamiento lógico, que les permita construir las habilidades y destrezas para resolver problemas y para ser creativos e innovadores. Como ya se ha mencionado, vivimos en un mundo de problemas complejos y altamente interconectados, por lo que es fundamental que quienes los resuelven reciban una formación integral y desarrollen capacidades desde el Pensamiento Complejo, el análisis, el razonamiento cuantitativo y cualitativo y la comunicación efectiva. Los programas de ingeniería necesitan un plan de estudios que les facilite a los estudiantes trascender desde una comprensión de las materias de ciencias de ingeniería dispares (conocimiento proposicional) a un enfoque holístico y sistémico, necesario para convertirse en profesionales responsables y críticos (conocimiento conectado). Además, los profesores deben centrarse explícitamente en capacitarlos en los sistemas de pensamiento y comprensión, con el objetivo de proporcionarles capacidades para comprender el carácter integrado y conectado de la gestión del conocimiento. Este proceso requiere contenidos basados en retos que utilicen enfoques de trabajo en equipo y aprendizaje con pares. De esta manera se capacitarán para ser pensadores creativos, además de alcanzar el desarrollo personal y profesional.

Este cambio de mentalidad es indispensable para la innovación y la investigación, pero no se logrará en el corto plazo. La experiencia en diversas instituciones muestra que este proceso implica generalmente un período de tiempo largo, porque se lleva a cabo principalmente debido a la necesidad de saber adaptarse a un entorno cambiante y bajo amenazas. A veces, renunciar a las creencias arraigadas es imposible, porque los estudiantes podrían incluso preferir lo tradicional en lugar de colocar en perspectiva sus creencias o puntos de vista y modificar su comportamiento. Por eso cobra importancia el

desarrollo del Pensamiento Complejo, porque ayuda a crear un ambiente de reto para que los estudiantes descubran o ratifiquen si la ingeniería es realmente su campo de formación [15]. Además, inventar e innovar productos o servicios exige esfuerzo y diferentes formas de pensar, sentir, actuar y comunicar, algo que no logran en su ejercicio profesional, aunque no siempre son conscientes de la necesidad de cambiar su mentalidad.

#### 4. CONCLUSIONES

La creciente complejidad del mundo y el cambio de los patrones cognitivos de la generación digital, desafían las actuales prácticas de enseñanza en ingeniería. Pero superar sus implicaciones no se logra con *mejoras* incrementales de los planes de estudios y los materiales, sino a través de cambios profundos y fundamentales en la formación en ingeniería. Por otro lado, los cambios necesarios son tan complejos que es prácticamente imposible implementarlos mediante reformas pasajeras y a corto plazo. Se requiere un proceso co-evolutivo entre la práctica educativa, el entorno externo, la formación de profesores y la revolución de los planes de estudios. Las ideas presentadas en este trabajo no resolverán los problemas fundamentales que enfrenta la formación en ingeniería, pero pueden ayudar a crear un ambiente donde pueda responder de manera productiva y responsable a las necesidades del mundo, porque, después de todo, los ingenieros han tenido un papel principal en su desarrollo.

En este artículo se presenta un análisis a la necesidad de innovar los procesos formativos en ingeniería; se propone pasar de los actuales modelos de educación inter o multidisciplinar a una formación transdisciplinar, haciendo hincapié en que la integración de disciplinas y dimensiones es fundamental para mejorar la respuesta a los problemas del mundo de hoy. El concepto de la transdisciplina reconoce la existencia de las disciplinas y de las fuertes conexiones intradisciplinarias, pero para mejorar las soluciones es necesario integrar sus herramientas, técnicas y métodos, junto con el desarrollo de creatividad e inventiva en un entorno de formación e investigación transdisciplinar integrado para cumplir con los retos de desarrollo del siglo XXI.

La formación holística, la transdisciplina y el Pensamiento Complejo pueden ayudar en el desarrollo de la creatividad, el ingenio y la inventiva de los estudiantes de ingeniería. Esto es necesario porque la creciente necesidad de comprender la importancia de la innovación para la competitividad desafía la enseñanza tradicional. Además, la falta de conocimiento base para resolver los complejos problemas del mundo actual es cada vez más apremiante. Por lo tanto, la formación en ingeniería debe dar como resultado ingenieros altamente calificados y bien formados, que interactúen con los diversos sectores sociales para hacerles frente a los problemas cuyas soluciones cruzan los límites disciplinares.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] R. Leifer, **Radical Innovation- How Mature Companies Can Outsmart Upstarts**, Boston: Harvard Business Press, 2000.
- [2] G. Nemet, "Demand pull, technology push, and government-led incentives for non-incremental technical change," **Research Policy**, Vol. 38, No. 5, 2009, pp. 700-709.

- [3] OECD, **The OECD Innovation Strategy: Getting a Head Start on Tomorrow**. Paris: OECD Publishing, 2010.
- [4] H. Rittell & M. Webber, "Dilemmas in general theory of planning," **Policy Sciences**, Vol. 4, No. 2, 1973, pp. 155-169.
- [5] D. Grasso & M. Burkins, **Holistic Engineering Education - Beyond Technology**, New York: Springer, 2010.
- [6] E. de Graaff & W. Ravesteijn, "Training complete engineers: Global enterprise and engineering education," **European Jou. Engin. Education**, Vol. 26, No. 4, 2001, pp. 419-427.
- [7] C. Dym, A. Agogino, O. Eris, D. Frey & L. Leifer, "Engineering design thinking, teaching and learning," **Journal of Engineering Education**, Vol. 94, No. 1, 2005, pp. 103-120.
- [8] J. Grimson, "Re-engineering the curriculum for the 21st century," **European Jou. Engin. Education**, Vol. 27, No. 1, 2002, pp. 31-37.
- [9] K. Berggren, D. Brodeur, E. Crawley, I. Ingemarsson, W. Litant, J. Malmqvist & S. Östlund, "CDIO: An international initiative for reforming engineering education," **World Trans. on Eng. and Technology Education**, Vol. 2, No. 1, 2003, pp. 49-52.
- [10] S. Sheppard, J. Pellegrino & B. Olds, "On becoming a 21st century engineer," **Journal of Engineering Education**, Vol. 97, No. 3, 2008, pp. 231-234.
- [11] M. Borrego & J. Bernhard, "The emergence of engineering education research as an internationally connected field of inquiry," **Journal of Engineering Education**, Vol. 100, No. 1, 2011, pp. 14-47.
- [12] E. Crawley, K. Edström & T. Stanko, "Educating engineers for research-based innovation - Creating the learning outcomes framework," **Proceedings of the 9th Inte. CDIO Conf.** (pp. 1-14). Cambridge, USA, 2013.
- [13] C. Baillie & J. Bernhard, "Educational research impacting engineering education," **European Journal of Engineering Education**, Vol. 34, No. 4, 2009, pp. 291-294.
- [14] P. Percy & S. Cramer, "Redefining quality in engineering education through hybrid instruction," **Journal of Engineering Education**, vol. 100, no. 4, 2011, pp. 625-629.
- [15] R. Burton, L. Schlemer & L. Vanasupa, "Transformational Innovation: Reflections on How to Foster it in Engineering Education Systems," **International Journal of Engineering Education**, Vol. 28, No. 2, 2012, pp. 275-285.
- [16] C. Dym, A. Agogino, O. Eris, D. Frey & L. Leifer, "Engineering Design Thinking, Teaching and Learning," **Journal of Engineering Education**, Vol. 94, No. 1, 2005, pp. 103-120.
- [17] HM Government, **Blueprint for technology**, Department for Business, Innovation and Skills. UK Government, 2010.
- [18] RAE, **Educating engineers to drive the innovation economy**, The Royal Academy of Engineering, Report Number 293074, London, 2012.
- [19] I. Torres, J. Guzmán & J. Muñoz, "Reuse of scientific research in Civil Engineering using semantic - Based experimental protocols," **Revista Actas de Ingeniería**, Vol. 1, 2015, pp. 47-54.
- [20] T. Pitso, "The creativity model for fostering greater synergy between engineering classroom and industrial activities for advancement of students' creativity and innovation," **The International Journal of Engineering Education**, Vol. 29, No. 5, 2013, pp. 1136-1143.
- [21] E. McWilliam, G. Hearn & B. Haseman, "Transdisciplinarity for creative futures: What barriers and opportunities?" **Innovation and Education and Teaching International**, Vol. 45, No. 3, 2008, pp. 247-253.
- [22] M. Bowen, "Technological innovation and engineering education: Beware the DaVinci requirement," **The Inter. Journal of Engineering Education**, Vol. 29, No. 1, 2013, pp. 77-84.
- [23] A. Järvinen et al. "Philosophy of Computer Science," **Revista Antioqueña de las Ciencias Computacionales y la Ingeniería de Software (RACCIS)**, Vol. 4, No. 1, 2014, pp. 34-41.
- [24] A. Ertas, T. Maxwell, M. Tanik & V. Rainey, "Transformation of higher education: The transdisciplinary approach in engineering," **IEEE Transactions on Education**, Vol. 46, No. 1, 2003, pp. 289-295.
- [25] M. Davies & M. Devlin, **Interdisciplinary higher education: Implications for teaching and learning**. Centre for the Study of Higher Education, The University of Melbourne, 2007.
- [26] J. Klein, "Disciplinary origins and differences," **Fenner Conference on the Environment: Understanding the population-environment debate: Bridging disciplinary divides** (pp. 10-20). Canberra, Australia, 2004.
- [27] H. Hadorn, S. Biber, W. Grossenbacher, G. Hirsch, D. Joye, C. Pohl, U. Wiesmann & E. Zemp, "Enhancing transdisciplinary research: A Synthesis in Fifteen Propositions," In Hirsch, G. et al. (Eds.), **Handbook of transdisciplinary research** (pp. 433-441). Zurich: Springer, 2008.
- [28] A. McMichael, "What makes transdisciplinarity succeed or fail? First Report," In A. Somerville and D. Rapport (Eds.), **Transdisciplinarity: Recreating integrated knowledge** (pp. 45-76). Oxford: EOLSS, 2000.
- [29] M. Tanik & A. Ertas, "Interdisciplinary design and process science: A discourse on scientific method for the integration age," **Journal of Integrated Design & Process Science**, Vol. 1, No. 1, 1997, pp. 76-94.
- [30] J. Jones, A. Ertas & M. Parten, "Multidisciplinary engineering design program at Texas Tech University," **Proceedings First World Conference on Integrated Design and Process Technology** (pp. 117-120). Austin, USA, 1995.
- [31] D. Radcliffe, "Shaping the discipline of engineering education," **Journal of Engineering Education**, Vol. 95, No. 4, 2006, pp. 5-6.
- [32] S. Nelson, "Transdisciplinary team training," **Proceedings Workshop on Global Transdisciplinary Education** (pp. 17-20). Pasadena, USA, 2001.
- [33] T. Tharp & J. Zalewski, "Economics of software engineering: Transdisciplinary issues in research and education," **Integrated Design & Process Technology Proceedings** No. 1, 2001, pp. 6-11.
- [34] M. Bickhard, "Systems and process metaphysics," In C. Hooker (Ed.), **Philosophy of Complex Systems** (pp. 91-104). USA: Elsevier, 2011.
- [35] M. Mahaux & C. Canon, "Integrating the complexity of sustainability in requirements engineering," **Proceedings First international workshop on Requirements for Sustainable Systems** (pp. 23-35). Toronto, Canada, 2012.

- [36] R. Lawrence & C. Després, "Introduction: Futures of Transdisciplinarity," **Futures**, Vol. 36, No. 4, 2004, pp. 397-405.
- [37] R. Wicklein & J. Rojewski, "The relationship between psychological type and professional orientation among technology education teachers," **Technical Education**, Vol. 7, No. 1, 1995, pp. 57-74.
- [38] D. Tate et al., "Foundations for a Transdisciplinary approach to engineering systems research based on design & process," In D. Tate et al. (Eds.), **The ATLAS Module** (pp. 45-65). Dallas: The ATLAS Publishing, 2006.
- [39] A. Kossiakoff et al., **Systems Engineering principles and practice**, USA: Wiley, 2011.
- [40] H. Jackson & J. Dick, **Requirements Engineering**, USA: Springer, 2002.
- [41] K. Cronin, **Transdisciplinary Research (TDR) and Sustainability**, New Zealand: Environmental Science and Research, 2008.
- [42] E. Morin, **Introducción al Pensamiento Complejo**, México: Gedisa, 1994.
- [43] K. Richardson, **Thinking about Complexity - Grasping the continuum through criticism and pluralism**, USA: Emergent, 2010.
- [44] D. Moody & M. Kortink, "From enterprise models to dimensional models: A methodology for data warehouse and data mart design," **Proceedings 2nd International Workshop on Design and Management of Data Warehouses** (pp. 12-24). Stockholm, Sweden, 2000.
- [45] R. Kimball et al., **Data warehouse lifecycle toolkit: Expert methods for designing, developing and deploying data warehouses**. USA: Wiley, 1998.
- [46] T. Gilb, **Competitive Engineering: A Handbook for systems engineering, requirements engineering, and software engineering using planguage**. Boston: Elsevier, 2005.
- [47] A. Abelló, J. Samos & F. Saltor, "Yam2 (yet another multidimensional model): An extension of UML," In M. Nascimento, M. Özsu & O. Zāiane (Eds.), **IDEAS** (pp. 172-181). USA: IEEE, 2002.
- [48] S. Luján, J. Trujillo & I. Song, "Extending the UML for multidimensional modeling," **LNCS**, No. 2460, 2002, pp. 290-304.
- [49] T. Pedersen & C. Jensen, "Multidimensional data modeling for complex data," **Proceedings 15th International Conference on Data Engineering** (pp. 336-345). Sydney, Australia, 1999.
- [50] E. Morin, **On Complexity**, London: Hampton Press, 2008.
- [51] E. Serna M., **Ciencia y Pensamiento Complejo – Desarrollo Transdisciplinar de un Paradigma**, Medellín: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación, 2015.
- [52] I. Predborska, "E. Morin's Complexity Paradigm in the Context of Informational Challenges to Education," **Systems: Connecting matter, life, culture and technology**, Vol. 1, No. 3, 2013, pp. 68-82.