

Necesidad de formación en I4.0 y los sistemas ciber-físicos, caso latinoamericana: ¿Qué se debe saber?

Need of training in I4.0 and cyber-physical systems, latin america case: What should be known?

Cardillo, Juan^{1*}; Chacón, Edgar²

¹Dapartamento de Sistemas de Control, EISULA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

² Dapartamento de Computación, EISULA, Fb acultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

*ijuan@ula.ve

Resumen

En este trabajo se presenta la condición y necesidad de formación de profesionales en la visión de Industria 4.0 (I4.0) y los Sistemas Ciber-Físicos (CPS). Consideramos el estado del arte en este campo y como esta se ve reflejada en el futuro inmediato en Latinoamérica. Se presenta una propuesta basada en directrices de formación para esta visión, tanto para los profesionales actuales como para los profesionales en formación, esto a partir de las carreras ya instauradas, así como del perfil para la creación de nuevas carreras que apunten a la formación de un profesional en I4.0 y CPS.

Palabras claves: Industria 4.0, Sistemas Ciber-Físicos, Educación-Formación en Industria 4.0 y Sistemas Ciber-Físicos.

Abstract

This paper presents the condition and need for training professionals in the vision of Industry 4.0 (I4.0) and Cyber-Physical Systems (CPS). We consider the state of the art in this field and how it is reflected in the immediate future in Latin America. A proposal based on training guidelines for this vision is presented, both for current professionals and for training professionals, this from the already established careers, as well as the profile for the creation of new careers that point to the formation of a professional in I4.0 and CPS.

Keywords: Industry 4.0, Cyber-Physical System, Education-Training in I4.0 and Cyber-Physical System

1 Introducción

Las etapas en el desarrollo de los sistemas de fabricación industrial desde el trabajo manual hasta la aplicación del concepto de de Industria 4.0 (I4.0), pueden presentarse como un camino a través de las cuatro revoluciones industriales. Este desarrollo se representa en la Figura 1.

La primera revolución industrial comenzó con la mecanización y la generación de energía mecánica en el siglo XIX; trajo la transición del trabajo manual a los primeros procesos de fabricación mecanizada, principalmente en la industria textil. Una mejor calidad de vida fue el principal impulsor del cambio. La segunda revolución industrial fue desencadenada por la electrificación que permitió la industrialización y la producción en masa. A menudo se menciona en este contexto

una cita de Henry Ford, quien dijo sobre el auto Ford T-Model "Se puede tener cualquier color siempre que sea negro". La cita captura bien la introducción de la producción en masa pero sin la posibilidad de personalización de los productos.

La tercera revolución industrial se caracteriza por la automatización con la introducción de la microelectrónica. En la fabricación, esto facilita la producción flexible, donde una variedad de productos se fabrica en líneas de producción flexibles con máquinas programables. Sin embargo, tales sistemas de producción aún no tienen flexibilidad en cuanto a la cantidad de producción.

La cuarta revolución industrial o I4.0, corresponde al concepto genérico de los Sistemas Ciber-Físicos (CPS, por sus siglas en ingles) aplicado a los Sistemas de Producción Industrial, que junto al Internet de la Cosas (IoT, por sus siglas en ingles) da origen al internet industrial de las cosas (IIoT, por sus siglas en ingles), cuya premisa es poder tener

una representación de la Información de Ingeniería (conocimiento del proceso) comprensible en las máquinas (manufactura inteligente). Desde la óptica de I4.0 se considera a los CPS como sistemas con la autonomía requerida por los elementos físicos para operar, negociar e interactuar usando la conectividad y la identificación única de los recursos para interoperar (Lee 2015).

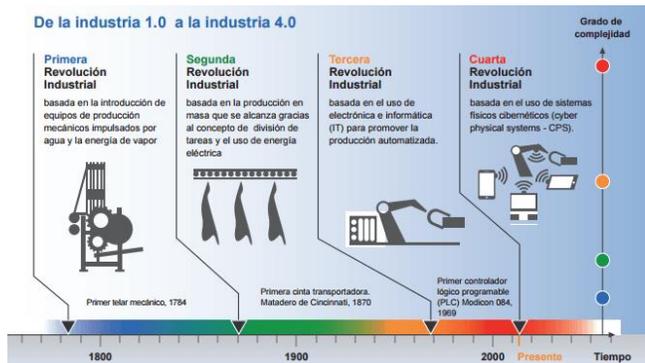


Figura 1: Evolución Industrial

Observemos que en un SCF la autonomía requiere del conocimiento de sí mismo con el fin de evaluar, decidir y ejecutar su funcionalidad usando la conectividad. Usando de manera anidada la definición anterior se extiende a I4.0, debido a que un proceso industrial puede estar compuesto por uno o varios SCF, podemos decir que I 4.0 es un CPS compuesto. La principal diferencia ente I4.0 y un SCF es que en los primeros su modelo de conocimiento no solo contempla el conocimiento de sí mismo y su entorno sino adicionalmente el modelo del negocio.

Para hablar con propiedad de los SCF, nos remontaremos a cuando el hombre creó el lenguaje. El hombre ha hecho del lenguaje su manifestación del pensamiento, dando origen al conocimiento. Sin el lenguaje no existe lugar para el conocimiento, ya que este es requerido para que la actividad mental se produzca. Las cuatro funciones de la mente son: comprender, juzgar, decidir y ejecutar. Solo la primera contribuye al conocimiento y por ende a la inteligencia. Aristóteles fue el primero en ofrecer un método de acceso al conocimiento de la realidad por medio de las relaciones a través de los conceptos de lógica: descubrió el método (organon) a partir de premisas. Con la evolución del conocimiento como: conocimiento cierto (matemática y geometría), conocimiento especulativo (filosofía, cosmología), conocimiento científico (observación de la naturaleza y la introducción de la experimentación científica realizada por Galileo (XVII D.C.) que junto con la generalización de los datos concretos (donde las matemáticas desempeñan un lugar destacado) obtenidos a través de ella, da inicio a la ciencia tal y como la conocemos hoy. Así, con el lenguaje dominado, la creatividad humana pone al servicio del hombre máquinas e instrumentos que no solo facilitan y aceleran el trabajo, sino que, para los no entendidos, los deslumbran (Artla y col., 2017). Desde Herón

de Alejandría (I A.C.), en donde se conseguía que las puertas de los templos se abrieran solas, que se escuchara música celestial al entrar en éstos, que esferas luminosas levitaran y dioses bailaran dentro de un altar, pasando por tres revoluciones industriales (mecanización, líneas de ensamblaje, electrónica e IT) hasta la obtención de equipos, máquinas e instrumentos portátiles (sistemas embarcados) de medición, cirugía robótica, entretenimiento, conectividad, etc., es natural que después de 21 siglos hablando, experimentando, desarrollando este tipo de sistemas (físicos) aparezcan con la era de la conectividad (IoT) los sistemas ciber-físicos (SCF) y la Industria 4.0 (I4.0). Así que podemos decir que los SCF y la I4.0 no son más que la evolución natural de los sistemas embarcados, sistemas críticos supervisados, sistemas de sistemas controlados, procesos industriales flexibles, para tener una empresa digitalizada. Muestra de ello es lo presentado por (Sabina 2013), en donde se muestra la percepción de los SCF y el mundo digital, estos componentes esenciales en la I4.0. Esta percepción es mostrada en la Figura 2, en donde se destacan tanto los aspectos que representan al mundo físico, su parte ciber y su digitalización así como los de su interacción.

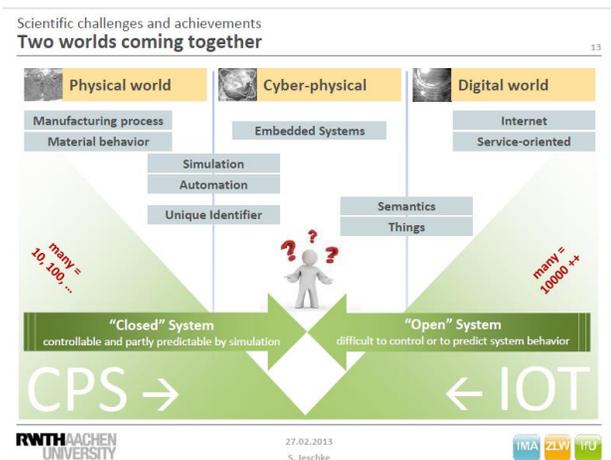


Figura 2: Percepción de los SCF, tomado de [Sabina, 2013]

2 Qué dice la comunidad internacional

Según (The national academy of Science – Engineering – Medicine, 2016), los avances en SCF podrían producir sistemas que puedan comunicarse y responder más rápido que los humanos (ejemplo: colisión entre automóviles) o ser más precisos (ejemplo: cirugía robótica), permitir un mejor control y coordinación de sistemas a gran escala, como la red eléctrica o los controles de tráfico, mejorar la eficiencia de los sistemas (por ejemplo, edificios inteligentes, uso de domótica e Innótica); y permitir avances en muchas áreas de la ciencia. Si bien es cierto que los sistemas ciber-físicos tienen el potencial de proporcionar una funcionalidad mucho más rica, incluida la eficiencia, flexibilidad, autonomía y

confiabilidad- que los sistemas que están débilmente acoplados, discretos u operados manualmente, no explican el cómo y por qué son así, también es cierto que los SCF puede crear vulnerabilidad relacionada con la seguridad y la confiabilidad debido a su nivel de interacción y conectividad.

Los SCF son "sistemas diseñados que se construyen a partir de, y dependen de la integración perfecta de algoritmos computacionales y componentes físicos. Los sistemas son diseñados a partir de componentes físicos (ciencia, física y matemática), las necesidades requieren autonomía en estos sistemas y la vía es usar la computación, así todas las áreas involucradas en un SCF (electrónica, eléctrica, mecánica, etc.) deben hacer sinergia con la computación.

En cuanto al tamaño de un SCF, este puede ser tan pequeño o menos que un páncreas artificial o tan grande, complejo e interconectado como una red eléctrica.

En la actualidad hay un gran interés por los SCF y, que es debido al desarrollo de la detección (sensado) de bajo costo, los poderosos componentes (hardware) del sistema integrado y las redes de comunicación ampliamente implementadas hace que la dependencia de SCF para la funcionalidad del sistema haya aumentado drásticamente. Así como también del interés de la I4.0 en donde la integración y la interconexión juegan un papel fundamente en lo que es núcleo de esta visión como lo es el gemelo digital de la industria.

Estos desarrollos técnicos en combinación con la creación de una fuerza de trabajo capacitada en ingeniería de CPS e I4.0 permitirán el despliegue de sistemas cada vez más capaces, adaptables y confiables con lo cual se garantiza el éxito de los SCF y la I4.0.

Los SCF ya están ampliamente implementados y se usan hoy de manera corriente. Ejemplos: Automóviles que evitan colisión, corrección del temblor natural de la mano humana con cirugía robótica, medición y establecimiento de condición de parámetros humanos relacionados con el bienestar corporal (glucosa, ritmo cardiaco, temperatura, etc.) y otros que intervienen (actúan) para restaurar el normal funcionamiento del cuerpo (marcapasos con desfibrilador).

Un campo de actuación tangible para los SCF es aquel que soporta misiones críticas que impactan en factores como los económicos y los sociales aumentando significativamente la seguridad y por ende concierne a la ciber-seguridad.

Actualmente el desarrollo e implementación de SCF son frecuentemente específicos para una aplicación, y no toman ventaja, incluso de la teoría limitada que hoy existe, y es incapaz de soportar el nivel de complejidad, escalabilidad, seguridad, protección, interoperabilidad y diseño y operación flexibles que serán necesarios para satisfacer las necesidades futuras. De aquí el énfasis de formación y consideraciones para el desarrollo de SCF. Una guía para determinar si un sistema es un CPS es dado por (Monostori y col., 2016), ver Figura 3.

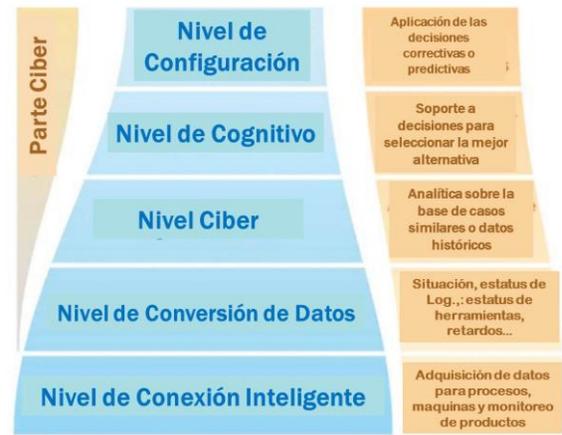


Figura 3: Estructura de CPS, [Monostori et al, 2016]

En los procesos industriales, para empresas y consorcios, quizás la mayor preocupación desde la década de los 80 ha sido la integración desde cualquier punto de vista y que se ha manifestado desde la aparición CIM (Computer Integrated Manufacturing), pasando por los enfoques de automatización (Cardillo y col., 2010) y los estándares ISA88 e ISA95, hasta la aparición de la visión de I4.0 en donde, tanto el esquema de integración dado por el modelo de gestión de fabricación colaborativa de ARC Advisory Group, donde su concepto central se basa en tres dominios que se cruzan (modelo globo de 3 ejes): la empresa, la cadena de valor y el ciclo de vida (Leitão y col., 2005), como el esquema de capas o aspectos que incorpora el mundo físico, el ciclo de vida del producto y la proyección de los modelos de negocios basados en TI, usado en el modelo de arquitectura de referencia tridimensional RAMI 4.0 (Plattform Industrie 4.0, 2018) que dan pie a la necesidad de tener una imagen digital de la empresa o gemelo digital, que es una representación de las características y el comportamiento de una fábrica según diversos niveles de detalle y el alcance que aborda. Sus capacidades pueden ser explotadas cuando se sincroniza con el mundo real, en el que se reflejan las condiciones reales de operación, para simular el comportamiento en tiempo real y, por lo tanto, pronosticar el rendimiento de fábrica (Modoni y col., 2019).

Los ingenieros responsables del desarrollo de SCF e I4.0 dentro de las organizaciones carecen, en la mayoría de los casos, de la formación necesaria y se les dificulta entender completamente, con la profundidad adecuada, los problemas técnicos asociados con las aplicaciones (software) y los componentes (hardware) de los SCF e I4.0, así como las técnicas para el modelado de: sistemas físicos, energía y potencia; actuación, procesamiento de señales y control de estos. Además, estos ingenieros pueden estar diseñando e implementando sistemas críticos para la vida sin una capacitación formal apropiada en los métodos de SCF e I4.0 necesarios para la verificación y garantía de la seguridad, confiabilidad, fiabilidad y protección. Esto debido a que actualmente los

sistemas desarrollados se basan en las consideraciones clásicas de cada una de áreas del conocimiento particulares sin hacer sinergia adecuada para poder incorporar y garantizar seguridad, confiabilidad, fiabilidad y protección de forma integral, punto crucial en los requerimientos para el desarrollo de SCF e I4.0. En caso de I4.0, todavía estamos lejos de su difusión a gran escala, hay desafíos que aún deben enfrentarse y algunas soluciones potenciales para cada uno de los desafíos identificados como lo son la adecuación de los conceptos, enfoques, arquitecturas a cada tipo de empresa, así como la concepción e implementación del gemelo digital.

Para ello se requiere tener profesionales (fuerza de trabajo) con una formación y habilidades apropiadas, que estarán mejor posicionados para crear y administrar la próxima generación de soluciones basadas en SCF para la I4.0. La consecución de estos profesionales requerirá de formación de “maestros” para que ellos eduquen a los nuevos profesionales con todas las habilidades necesarias, integradas desde cero, así como también proporcionar a los profesionales actuales la necesaria educación complementaria.

2.1 Motivación

Los SCF emergen como un área de la ingeniería con implicaciones económicas y sociales significativas. Los principales sectores industriales tales como transporte, medicina, energía, defensa y tecnología de la información necesitan cada vez más profesionales capaces de diseño e ingeniería de productos y servicios de ingeniería que combinan íntimamente elementos ciber (hardware y software informático) y componentes físicos y maneje sus interacciones e impacto en el entorno (ambiente) físico. Aunque es difícil cuantificar la demanda, una posible implicación es que se necesitarán más ingenieros capaces en SCF. La I4.0 emerge como una evolución natural asociada al mundo digital, internet (industrial) de las cosas, los SCF y la empresa inteligente por lo tanto este profesional abarca toda las competencias de los Ingenieros en CPS aplicados a la Industria, esto algunos autores lo llaman los sistemas ciber físicos de producción (CPPS, por sus siglas en ingles).

Es probable que el futuro del personal responsable del desarrollo de los SCF e I4.0 incluya una combinación de: (1) ingenieros capacitados en campos clásicos (como Ingeniería Eléctrica, Computación, Mecánica, Sistemas, etc.); (2) ingenieros capacitados en campos específicos de ingeniería aplicada como la Ingeniería Aeroespacial, Civil, Química, Geológica, Hidráulica, Agrónoma, Agrícola, y Pecuaria; (3) ingenieros de SCF, quienes se enfocan en el conocimiento y las habilidades que abarcan la tecnología cibernética y los sistemas físicos que operan en el mundo físico; (4) ingenieros en I4.0 quienes se enfocan en la empresa como la fusión del mundo del negocio con lo Ciber-Físico, para generar producto ECO. Una quinta (5) opción, debida a la interacción de diversas disciplinas es que las carreras de ingeniería tengan

nombre y apellido, creando una diversidad tan grande como las necesidades mismas, como un ejemplo descabellado tener un ingeniero biomédico en manufactura aditiva de órganos.

2.2 Tecnologías y Técnicas claves de la Industria 4.0

Unas bases técnicas y tecnológicas que se encuentran actualmente cada vez más desarrolladas y que permitirán transformar los sectores de la energía y la fabricación, conectando el producto en una cadena de valor totalmente integrada y transparente deben ser conocidas por el personal responsable del desarrollo de I 4.0.

Estas técnicas y tecnologías incluyen:

- Internet de las Cosas (IoT), evolucionando hacia Internet Industria de las cosas (IIoT)
- Robótica avanzada e inteligencia artificial (IA)
- Sistemas para la integración vertical y horizontal
- Comunicación M2M – captura de datos
- Sistemas ciber-físicos (CPS) en Sistemas Ciber-Físicos de Producción (CPPS)
- Análítica de datos y Big Data
- Hiper-conectividad
- Cloud Computing
- Ciberseguridad
- Fabricación digital, Manufactura Aditiva, Adaptiva
- MES/MOM
- Realidad virtual y aumentada

La incorporación de estos elementos, en la cadena de valor de la empresa, facilita el flujo de información desde el mundo físico a las decisiones de negocio en tiempo real. No es necesario aplicar todas las tecnologías para modificar nuestra fábrica para llevarla a una fabrica inteligente, ya que solo se usará aquello que se determine que es importante para la empresa. Esto incluye un estudio que muestre la condición actual de la fábrica, cual es la fábrica requerida a corto mediano y largo plazo y un plan inversión en donde está reflejada la fuerza de trabajo.

La conexión de los dispositivos industriales a la red posibilita la obtención de datos en tiempo real y el control de los mismos de forma remota. Por ello el modelado, la analítica de datos y la Big Data puede convertirse en uno de nuestros grandes aliados. El análisis y la gestión de los datos te llevan a la optimización de los diferentes procesos industriales y energéticos.

Es por esto que la convergencia entre la automatización de los procesos industriales y las Tecnologías de Información permiten mejorar las operaciones (automatización, flexibilidad, velocidad y productividad), reducir costes, así como mejorar la calidad de los procesos.

2.2 Vías para el conocimiento de los SCF e I4.0

Debido al conjunto de áreas de conocimiento involucra-

das en los SCF y los requerimientos en I4.0, se pueden concebir varios caminos para alcanzar los conocimientos y habilidades en ellos. Una de las razones es que, es probable que la fuerza laboral incluya tanto expertos en los dominios que conocen los principios de los SF, como un nuevo tipo de ingeniero experto en la intersección de problemas físicos y cibernéticos. Otra razón es que muchos enfoques diferentes se llevarán a cabo en los colegios y universidades, dependiendo tanto de las circunstancias actuales, como las estructurales existentes en los departamentos y el currículo vigente, así como de la experiencia de las facultades y los recursos disponibles. Esto son condiciones particulares en cada uno de los centros educativos y puede particularizarse mucho más si se enfoca en un tipo de SCF o de industria.

Diseñar un grado o profesional de SCF e I4.0 es bastante complejo e implica, por ejemplo, un equilibrio cuidadoso de los aspectos físicos y cibernéticos y el conocimiento general de SCF e industria y de la aplicación. Debido a que los currículos de los grados de SCF e I4.0 están apenas naciendo, sin duda evolucionarán sustancialmente a medida que se implementen más ampliamente. Además, los programas de SCF y la visión de I4.0 seguramente compartirán con la mayoría de los programas de grado de ingeniería, el desafío de priorizar los temas para encajar en un programa de estudio manejable de 4 o 5 años, así como estudios de cuarto y quinto nivel.

Como en toda implementación de una nueva filosofía de pensamiento, habrá oportunidades, y obstáculos para implementar un currículo de SCF e I4.0 en las instituciones Universitarias

Ya existen iniciativas de cursos incluyendo cursos en línea enfocados al aprendizaje (teoría y práctica) sobre SCF, entre las cuales podemos nombrar:

- Los cursos de (EECS 149, 2012), "Introduction to Embedded Systems" de la Universidad de California, Berkeley, es un curso tomado por estudiantes de pregrado, del último año y de postgrado.
- El curso, cuyo libro texto es de Lee y Seshia, "Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach" (Jensen y col., 2011), y las grabaciones de las conferencias se publican en línea en [EECS149].
- El laboratorio de ejercicios da a los estudiantes experiencias con tres niveles distintos de sistemas empotrados. En cada caso, se les enseña a los estudiantes a pensar críticamente sobre la tecnología, a investigar a fondo los mecanismos y abstracciones que se proporcionan, y a comprender las consecuencias de las abstracciones elegidas en el diseño general del sistema, (Jensen y col., 2011, Jensen y col., 2012, Lee y col., 2012).
- Hay iniciativas en plataformas de cursos masivos en línea MOOC (por sus siglas en inglés). Se han obtenido resultados iniciales para la generación automática de problemas y soluciones para ejercicios de libros de texto y auto-evaluación (Sadigh y col., 2012).

También empiezan a aparecer propuestas de estudios de Postgrado, en donde se hace presente la actualización (adecuación) de los programas de maestría, en donde podemos mencionar el Master de Ingeniería de Sistemas Complejos de la Universidad de Paris Saclay que incluyen tópicos de SCF (Mention de Master Ingénierie des Systèmes Complexes (ISC) de l'Université Paris Saclay, Parcours (M2) CSCP: Conception des Systèmes Cyber-Physiques). Así como un programa tangible en I4.0 como lo es el de la (Universidad de Deusto, 2019), Bilbao-España,

3 I4.0 en Latinoamérica

La mayoría de los países de América latina se han manifestado sobre esta nueva visión de la industria, desde México hasta Argentina, ya bien sea en pro o en contra, una característica fundamental en todas las observaciones es la asimilación, entendimiento y comprensión de esta visión tanto en el sector industrial, para su implementación, como el de las casas de estudio, para la formación de profesionales (capital humano).

Como nuevo paradigma que aborda uno de los pilares fundamentales de la economía de un país, como lo es el sector industrial, y que tarde o temprano se manifiesta en las naciones por el hecho de la competitividad, acá solo nos referiremos al impacto y los requerimientos de capital humano para alcanzar las capacidades sobre I4.0 y SCF, dejando a un lado los alcances o ajustes de índole social y/o económico.

3.1 La Industria en América Latina

La industria Latinoamérica subyace a las multinacionales y si éstas asumen como paradigma la I4.0, por ende, se verá reflejada en América Latina. En los sectores automotriz y de electrónica, así como la agroindustria, y los sistemas críticos como lo son agua, gas, electricidad, transporte hay potencial para ser líderes digitales (I4.0). El uso e implementación de las tecnologías claves en SCF e I4.0, mencionadas anteriormente, son instauradas muy rápidamente en las multinacionales, en cambio en las PyMES existe una diatriba (limbo) por los costos asociados. Como reflexión, para el caso de América Latina, las transiciones de la fuerza laboral, en una era de automatización, van a estar fuertemente afectadas por el costo de la mano de obra, que son relativamente bajos, versus una adecuación, entrenamiento y costos en el proceso de automatización. Quizás nuestra mayor barrera es que no nos ponemos a pensar en nuestro y por el contrario pensamos en lo que hacen las multinacionales. Ante cualquier escenario contar con el capital humano con las capacidades requeridas es un reto en cualquier país.

3.2 Formación de Pre y Post grado en América-Latina

En la actualidad no se tiene un profesional con el perfil para I4.0 desde los SCF, solo se cuentan con profesionales en

las áreas básicas y clásicas como lo son: Ing. Eléctrica, Ing. Electrónica, Ingeniería y Ciencias de la Computación, Ing. Mecánica, etc., presentes de forma directa y que de forma indirecta están asociadas otras áreas de conocimiento como: Química, Geológica, Biología, Civil, Hidráulica, Medicina, Farmacia, etc. que hacen sinergia con las anteriores para formar grupos interdisciplinarios. Quizás algunos profesionales pueden estar más cerca porque hacen conjunciones de las áreas básicas y clásicas anteriores como lo son: la Ingeniería de Sistemas, la Mecatrónica y de alguna manera, la Ingeniería Industrial

Ingeniería de Sistemas:

Como su nombre lo indica, el uso de la ingeniería en los sistemas, así que es la candidata natural para evolucionar a los Sistemas Ciber Físicos. Es mucho menos común que cualquiera de las ingenierías involucradas en I4.0 Pero esta ingeniería al menos tiene 3 connotaciones que la hacen 3 carreras completamente diferentes en Latinoamérica.

La primera connotación y la más diversificada, asociada con un ingeniero en el área de la computación. Un ingeniero en sistemas labora en los campos del diseño y la programación de sistemas operativos en las empresas, así como el mantenimiento de estos y otros softwares utilizados para el mejor desempeño de la institución. El profesional en esta área corrige, crea, evalúa y supervisa distintos tipos de proyectos, entre estos la valorización del costo, efectividad del personal, la maquinaria y recursos tecnológicos utilizados y los problemas que pueda surgir de estos. Esta connotación de Ing. de Sistemas está presente en un buen número de universidades de Latinoamérica, con excelente demanda y los profesionales poseen buenos salarios.

La segunda connotación asociada a ingeniería de sistemas blandos que involucran los sistemas sociales y los económicos. Esta connotación de Ing. de Sistemas no es muy difundida y está presente en un número reducido de universidades en Latinoamérica.

La tercera connotación asociada a Ing. de Sistemas propiamente dicha, que permite estudiar y comprender a los sistemas, con el propósito de implementar u optimizar sistemas complejos. Esto es la aplicación tecnológica de la teoría de sistemas a los esfuerzos de la ingeniería. En esta connotación, la ingeniería de sistemas integra otras disciplinas y grupos de especialidad en un esfuerzo de equipo, formando un proceso de desarrollo centrado. Un programa particular con esta connotación está en la Universidad de los Andes-Venezuela, conformado con un ciclo básico de formación en ingeniería tradicional, y un ciclo profesional con presencia de un hilo vertical de materias en programación y un ciclo de formación profesional que abarca las áreas de investigación de operaciones, sistemas computacionales y Control y Automatización con el fin de:

- Evaluar las necesidades y problemas de las organizaciones, con la finalidad de analizar, diseñar, implantar y gestionar sistemas, donde se vinculen las áreas de automática, computación e investigación de operaciones.

- Administrar e innovar sobre los recursos tecnológicos para el logro de una adecuada gestión, que satisfaga las demandas de las organizaciones.

- Considerar la Ingeniería de Sistemas como un cuerpo sistematizado e interrelacionado de conocimientos en constante revisión y cambio.

Mecatrónica

Esta carrera, muy difundida en Latinoamérica incluye conocimientos de la electromecánica y la electrónica. Incluye el conocimiento de diversos sistemas de diseño de productos y procesos. También brinda herramientas para la solución de problemas concretos en tecnología de la computación.

El profesional en Ingeniería Mecatrónica proporciona sistemas integrales, inteligentes y flexibles, con el fin de crear productos fiables, económicos y en armonía con el ambiente. Se dedica a la implementación y el control de sistemas industriales.

Perfil, del profesional en Ingeniería Mecatrónica: Emplea sus conocimientos matemáticos y científicos para la solución de problemas concretos. Desarrolla experimentos. Automatiza procesos industriales. Desarrolla y evalúa el mantenimiento de los sistemas mecatrónicos. Evalúa la viabilidad económica, así como el impacto ambiental y social de los proyectos en su ámbito. Vela por el cumplimiento de los estándares de calidad nacional e internacional.

Ingeniería Industrial

Es otra de las carreras muy difundida en Latinoamérica. Estudia, dirige y controla el análisis de los diferentes métodos, procesos, sistemas de procedimientos de producción, examina y observa los diversos procesos e informaciones relativas a las ventas y volumen de producción, mejoras de productos acabados, materiales de desperdicio y disposición de las fábricas. Planifica, coordina y dirige las actividades que se realizan en las empresas en forma efectiva, con el fin de eliminar interrupciones y paralizaciones en el proceso y utilización de mano de obra y material innecesario.

Un ingeniero industrial puede desempeñarse en áreas tan diferentes en una empresa como la logística, la administración, marketing, recursos humanos y sistemas de producción de bienes y servicios.

Como puede apreciarse, hay carreras, como las antes descritas, íntimamente relacionadas con I4.0 y los SCF.

En estudios de cuarto nivel, existen Postgrado y Maestrías, que afianzan o complementan la formación de pregrado y están dirigidas a la automatización y control de procesos.

4 Nuestra visión

A continuación, mostraremos las definiciones básicas asociadas a I4.0 y los SCF que, a nuestro haber, nos inducen una idea lo suficientemente clara para abordar el tema de la enseñanza de SCF e I4.0 desde los actuales pensum de estudios hasta la creación de un nuevo currículo asociado a Ingenieros de I4.0 y/o Ingenieros de SCF.

I4.0

Como ya dijimos anteriormente, I4.0 corresponde a un concepto más genérico de los SCF asociado a los Sistemas de Producción Industrial. Considerandos a los SCF como la autonomía requerida por los Sistemas Físicos para operar, negociar e interactuar usando la conectividad y la identificación única de los recursos para interoperar, da origen al internet industrial de las Cosas (IIoT), cuya premisa es poder tener una representación de la Información de Ingeniería (conocimiento del proceso) comprensible en las máquinas (manufactura inteligente). Así consideramos que I4.0 tiene cuatro componentes:

- Los SCF
- IoT
- Análítica de datos, Big Data
- Manufactura Inteligente

Alemania es el país con más auge en la implementación de esta visión, seguido por el resto de la comunidad europea quien a mostrado su preocupación por la falta de profesionales capacitados, seguido por EEUU. Cada uno con un enfoque diferente para los primeros asociados a los CPPS y los segundos a Smart Factory, pero ambos coinciden de la digitalización de la empresa.

Sistemas Ciber Físicos

Un sistema ciber físico (sistemas físicos con autonomía), está compuesto por dos entidades básicas: la primera entidad en el sistema físico y la segunda entidad que llamamos ciber. Monostori y col., 2016 y Cardin 2019 muestran la arquitectura 5C (Conexión, Conversión, Ciber, Cognitivo y Configuración) dada por consta de 5 niveles en una forma de flujo de trabajo secuencial e ilustra cómo construir un Sistema ciber-Físico para procesos (CPPS). Una descripción de esta arquitectura y una aplicación para máquinas inteligentes dada en (Lee y col., 2015, monostors y col., 2016), ver Figura 3. Esta arquitectura muestra una forma de implementar CPS. El Objetivo de un SCF es establecer o restablecer los valores Nominales de interacción, generar una configuración y un modo de operación en el sistema Físico, así como manejar, seguir el comportamiento del sistema físico por medio de la entidad ciber, creando un sistema físico autónomo que interactúa con otros.

4.1 Formación en América-Latina

Como vemos en la Figura 4, I4.0 como SCF está conformado por 4 áreas:

- Aplicación: Los Sistemas Físicos a los cuales se les quiere dar autonomía
- Representación del Conocimiento: Área clave para poder analizar, medir, manejar, comparar, establecer el comportamiento del sistema físico
- Mundo IT & OT: Área requerida para instaurar la autonomía del Sistema Físico

- Integración: Área que establece la sinergia entre las áreas anteriores

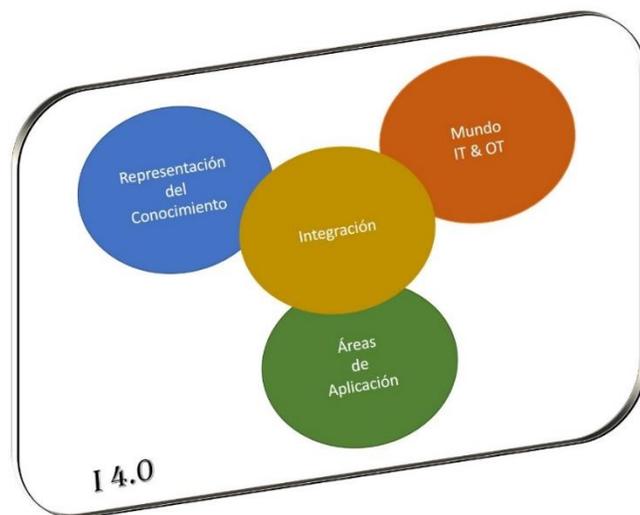


Figura 4: Áreas involucradas en I4.0 como SCF

Un esquema de refinamiento para comprender que involucra cada área se muestra en la Figura 5. Así en cada área podemos ver:

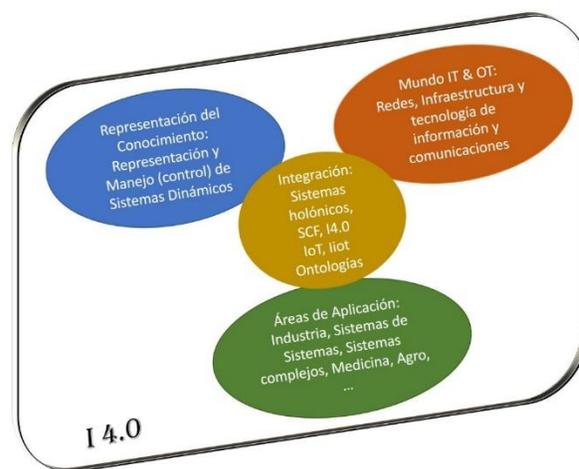


Figura 5: Refinamiento de Áreas de I4.0 como SCF

- Áreas de Aplicación: La industria en general, la agroindustria, la medicina, los sistemas críticos (sistemas de sistemas o sistemas complejos) como lo son agua, gas, petróleo, electricidad, transporte.
- Representación del Conocimiento: la manera natural de representar el conocimiento de los sistemas físicos por medio de su comportamiento y la forma natural de representarlos es por medio de los sistemas dinámicos.
- Mundo IT & OT: la instauración de la autonomía requiere de redes, infraestructura y tecnología de información y comunicaciones.
- Integración: En esta área se requiere de arquitecturas, metodologías, estándares y enfoques que establecen la vía y

los mecanismos de implementación de la filosofía de I4.0 como SCF.

Observaciones:

- El campo SCF e I4.0 continuará evolucionando a medida que surjan nuevas aplicaciones y se realice más investigación.
- La combinación de programas ofrecidos por las universidades reflejará las perspectivas de las instituciones individuales, sus recursos y la demanda que las universidades ven de los estudiantes y sus empleadores, y a su vez afecta la educación de fondo de la fuerza de trabajo en SCF e I4.0. Con el tiempo, a medida que el campo en sí mismo cambie y madure, la educación y la demanda de los empleadores evolucionarán conjuntamente.
- Los graduados en ingeniería y ciencias de la computación tienen más oportunidades de ganar conocimiento y habilidades (destrezas) requeridas en la ingeniería de SCF y por ende en I4.0.

Aquí mostraremos en resumen el conocimiento y las habilidades necesarias para un ingeniero en SCF e I4.0. Se obtiene de la revisión de los cursos, programas y materiales de instrucción existentes, así como de la consideración de tópicos resaltantes desde expertos en la industria. El énfasis se centra sobre los principios básicos y los fundamentos que reflejan el desafío de abarcar los aspectos cibernéticos y físicos en un currículo de ingeniería ya sobrecargado.

- Principios que definen la integración de aspectos físicos y cibernéticos en áreas tales como comunicación y redes, operación en tiempo real, sistemas distribuidos y embarcados, propiedades físicas del hardware y el entorno, y la interacción humana. Se debe hacer énfasis en el conocimiento del proceso físico y por ende el conocimiento en matemáticas, física y ciencias básicas donde lo requiera debe ser acentuado.

- Los fundamentos de SCF en (1) conceptos básicos de computación, (2) computación para el mundo físico, (3) matemática discreta y continua, (4) aplicaciones transversales, (5) modelado en todos los aspectos y (6) desarrollo de sistemas. (Dinámica de sistemas a través de Sistemas dinámicos continuos y a eventos para mostrar sistemas híbridos requeridos en el modelado y desarrollo de SCF)

- Las características requeridas en SCF e I4.0, como seguridad y privacidad; interoperabilidad; confiabilidad, fiabilidad, y dependibilidad; manejo de potencia y energía; la seguridad; estabilidad y rendimiento de los sistemas dinámicos involucrados; y factores humanos y usabilidad.

- Las habilidades y competencias, radican en que la creciente escala y complejidad de los sistemas de ingeniería significa que los ingenieros trabajan cada vez más en colaboración con expertos de múltiples disciplinas. Las habilidades "blandas" en áreas tales como la comunicación, la flexibilidad y la capacidad de trabajar en equipos, incluidas las disciplinas múltiples, son de particular importancia para la ingeniería de SCF e I4.0 porque el trabajo es intrínsecamente

interdisciplinario. El ritmo de cambio en el conocimiento de la ciencia y la ingeniería en general y la novedad y el flujo rápido de los SCF e I4.0 sugieren que se necesitan cursos y programas de SCF e I4.0 que enfatizan el aprendizaje y el pensamiento crítico, así como técnicas y métodos específicos.

4.2 Necesidades de Formación

De las áreas de competencia de la I4.0 como SCF, podemos ver que las tres primeras áreas (Aplicaciones, Representación del Conocimiento, Mundo IT & OT) están presentes y pertenecen a los esquemas tradicionales y clásicos de formación profesional, en las disciplinas de la ciencia y la tecnología esto corresponde a todas las ingeniería y ciencias de la computación incluyendo ingeniería de sistemas y mecatrónica. Abordar esta visión de I4.0 y de los SCF, en los actuales momentos, es por medio de un grupo interdisciplinario que adolece de la cuarta área, Integración.

Entonces, ¿es necesario "Crear un nuevo profesional con esta nueva visión dando origen, por ejemplo, a un ingeniero en I4.0 o un ingeniero en SCF"?, y la respuesta es "sí". Una forma natural de generar este nuevo profesional es a partir de hacer sinergia entre los actuales programas de estudio y crear un nuevo programa. Este nuevo profesional (muy específico) sería bien cotizado y traería como consecuencia que algunos de los programas actuales verían una merma en su demanda. Si bien lo anterior puede ser cierto, también lo es, que los programas actuales poseen estudios a profundidad en áreas muy específicas que no pueden incorporarse del todo a este nuevo profesional, es decir estas siguen siendo necesarias e importantes. Desde otro punto de vista, la sinergia para crear este nuevo profesional abriría una nueva posibilidad en los programas actuales, ya que estos pueden incorporar cursos de forma directa (incluida en sus pensum como materias o ejes transversales) o indirecta (optativos, adicionales) de una formación complementaria a su área de conocimiento asociadas a las áreas de I4.0 y SCF. Lo que permitiría a estos profesionales comprender y participar en el estudio, identificación, análisis, diseño y mantenimiento en esta visión. Es importante resaltar que los tanto a los estudiantes como a profesionales actuales con esta formación complementaria tienen conocimiento pleno en el área específica y conocimiento certero-aceptable de las áreas restantes importantes en I4.0 con los SCF.

La implantación de cursos complementarios en los programas actuales, así como en la instauración de un nuevo programa debería tener el apoyo de un conocedor (experto) en el área de integración en procesos (industriales) que realice la sinergia necesaria para equilibrar los contenidos en cada uno de los programas.

Cualquier cambio en los programas de pregrado debe estar soportada por una planta profesoral y el éxito de cualquier cambio estará sujeto a que esta pueda involucrarse en líneas de investigación dirigidas a I4.0 y SCF, proyectos interinstitucionales que refuercen los programas actuales y

creen nuevos programas de cuarto y quinto nivel, las cuales poseen las mismas connotaciones que las descritas para el pregrado, con la salvedad que debido a la modalidad de estudio es mucho más flexible y posible hacer la simbiosis e incorporar las áreas complementarias en cada programa de estudio y por ende la creación de un nuevo programas asociados a I4.0 y SCF.

La otra pregunta que hay que responder es: ¿Qué hacer con los profesionales actuales?

Para ellos, una modalidad que es práctica y pragmática, es la de formación continua a través de cursos no conducentes a grado o diplomados. Como ya lo referimos los profesionales actuales pertenecen a una de las áreas del conocimiento en I4.0 y SCF. Ellos requieren de un programa de formación dirigido a la actualización en su campo de competencia y comprensión de las áreas complementarias en particular en integración. Este nivel de formación debe permitir conocer el impacto, la necesidad y los requerimientos que los profesionales en su campo de actuación en las diferentes áreas y empresas necesitan para instaurar esta filosofía. Esta formación debe permitirle al participante ir de la concepción industrial actual a la de I4.0 bajo el enfoque de SCF. Con la visión de integración (cuarta área). Cada área podrá tener una percepción y conocimiento certero de las áreas restantes lo que permite que cada uno pueda tener una visión global del proceso asociado a I4.0, esto es un modelo global que es elaborado desde la integración.

4.3 Instauración de Ingenieros en SCF o Ingeniero en I4.0

Poder crear un profesional en SCF e I4.0 es un reto, se ha indicado que al menos 3 fases son requeridas en los centros de educación para poder crear un Ingeniero en SCF y/o I4.0, éstas son:

- Comprender y conocer a profundidad las características, principio y habilidades requeridas en un SCF e I4.0.
- A partir de las áreas asociadas a las carreras clásicas en ingeniería, establecer sinergia con aquellas carreras que se dedican al estudio de los sistemas físicos, esto incluye a los químicos, mecánicos, biológicos, geológicos, medicina e industriales, etc. para incorporar a los SCF e I4.0 en estas por medio de cursos complementarios que ayuden a establecer las habilidades y competencias requeridas
- Con la madurez en SCF e I4.0, crear la nueva opción, que en principio sea, en Ingeniería de SCF o Ingeniero en I4.0.

5 Conclusiones

Como la evolución natural de la tercera revolución industrial conjugada con la actual interconectividad, aparece la I4.0 desde los SCF.

Se requiere de formación de pregrado, del último año de formación, en áreas complementarias que permita la integración

de estos profesionales a la interdisciplinariedad de la visión de I4.0, así como la creación de una nueva carrera dirigida a I4.0 y/o SCF.

Se requiere de una planta profesoral que soporte las actualizaciones de los programas vigentes, así como los nuevos programas. Una vía es poder establecer nuevas líneas de investigación y proyectos interdisciplinarios (interinstitucionales) que refuercen los programas actuales de pregrado, maestría y doctorado.

Cualquier cambio en los currículos actuales o nuevos debe tener un fuerte componente en dinámica de sistemas vía sistemas dinámicos (continuos, discretos, híbridos), así como en sistemas computacionales e Integración

La primera fase, debe ser una sensibilización en el ámbito industrial para migrar a esta nueva visión de I4.0 como SCF y que se involucre de forma activa en el establecimiento de los requerimientos tanto de formación como de desarrollos e implantación operacional.

La segunda fase, formación a los actuales profesionales, con planes de estudio/formación continua a través de cursos no conducentes a grado, talleres o diplomados, dirigido a la actualización en su campo de competencia y comprensión de las áreas complementarias en particular en integración de I4.0 desde los SCF.

La tercera fase evaluación y ajuste de lo ya instaurado.

La cuarta fase creación de nuevos programas de pregrado, maestría y doctorado

Si bien es cierto, hay una necesidad actual por tener un ingeniero en CPS y/o I4.0, el futuro puede requerir de una diversidad tal de profesionales en el área de la ingeniería que profesionales con nombres tan descabellados como el presentado en la sección 2.1 motivación.

Referencias

- Lee EA, 2015, The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models Sensors, 15, 4837-4869.
- Artola M, Sánchez JM, 2017, Ciencia, lo que hay que saber, ISBN: 978-84-670-5011-0, Espasa Libros.
- Sabina J, 2013, Everything 4.0? Drivers and Challenges of Cyber-Physics System, Forschungsdialog Rheinland – Invited Talk Wuppertal, December 4th
- The national academy of Science – Engineering – Medicine, 2016, A 21st Century Cyber-Physical Systems Education, International Standard Book Number-13: 978-0-309-45163-5.
- Cardillo J, Chacón E, 2010, Evolution of Integrated Automation Approach, 9th WSEAS International Conference on Advances in Computational Intelligence, Man Machine Systems and Cybernetics, ISSN: 1792-6998, ISBN: 978-960-474-257-8, pag 274-288, December.
- Cardin O, 2019, Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework, Computers in Industry. 10.1016/j.compind.2018.10.002

Leitão P, Colombo A, Restivo F, 2005, ADACOR: a collaborative production automation and control architecture Intelligent Systems, IEEE, 20, 58 - 66

Platform Industrie 4.0, 2018, The Structure of the Administration Shell: Trilateral Perspective from France, Italy and Germany Platform Industrie 4.0.

Modoni GE, Caldarola EG, Sacco M, Terkaj W, 2019, Synchronizing physical and digital factory: benefits and technical challenges Procedia CIRP, Elsevier, 472-477.

EECS 149, 2012, lecture webcast, University of California, Berkeley, [Online]. Available: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/chess/eecs149/>.

Seshia SA, Lee EA, 2010, An Introductory Textbook on Cyber-Physical Systems, Workshop on Embedded Systems Education (in conjunction with ESWeek), Scottsdale, AZ, October.

Jensen, JC, Lee EA, Seshia SA, 2012, Teaching Embedded Systems the Berkeley Way, Workshop on Embedded Systems Education (in conjunction with ESWeek), Tampere, Finland, October

Jensen JC, Lee EA, Seshia SA, 2011, An introductory capstone design course on embedded systems, IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS 2011), Rio de Janeiro, pp. 1199-1202.

Lee E A y Seshia S A, 2012, An Introductory Lab in Embedded and Cyber-Physical Systems, Berkeley, CA: LeeSeshia.org. [Online]. Available: <http://LeeSeshia.org/lab>

Sadigh D, Seshia SA, Gupta M, 2012, Automating exercise generation: A step towards meeting the MOOC challenge for embedded systems, Workshop on Embedded Systems Education (in conjunction with ESWeek), Tampere, Finland, October.

Universidad de Deusto, 2019, Programa en Industria 4.0, <https://www.deusto.es/cs/Satellite/deusto/es/masteres/estudios-masteres/programa-en-industria-4-0/programa>.

Monostori L, Kádár B, Bauernhansl T, 2016, Cyber-physical systems in manufacturing. CIRP Ann - Manuf Technol 65:621–641. doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.

Lee J, Ardakani D, Yang S, Bagheri B, 2015, Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation, Procedia CIRP, Elsevier, 2015, 38, 3-7

Recibido: 28 de septiembre de 2019

Aceptado: 06 de noviembre de 2019

Cardillo, Juan: Profesor Titular del Departamento de Sistemas de Control de la Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida – Venezuela. Doctor en Automática (Université Paul Sabatier Toulouse-France), Doctor en Ciencias Aplicadas (Universidad de Los Andes), ijuan@ula.ve. Integración en procesos de producción basados en enfoque holónico con implemen-

tación de modelos, Automatización Industrial, Control Supervisorio

Chacón, Edgar: Prof. Titular jubilado, perteneciente al departamento de Computación, de la Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Doctor en Ingeniería (Université Paul Sabatier, Toulouse – Francia, echacon@ula.ve. Asesor SIMAC S.A.S Medellín – Colombia. Integración en procesos de producción basados en enfoque holónico con implementación de modelos, Automatización Industrial, Control Supervisorio. Gestión en producción. Correo electrónico: echacon@ula.ve