

Sistema Ciber-Físico de una CNC para la producción de circuitos impresos

KEWIN J. SAUMETH CUDRIZ ⁽¹⁾, FEDERICO PINILLA TARAZONA ⁽²⁾,
A. FERNÁNDEZ ARBOLEDA ⁽³⁾, DAVID J. MUÑOZ ALDANA ⁽⁴⁾, LUIS A. CRUZ SALAZAR ⁽⁵⁾

(1) ksaumeth@tecnocomfenalco.edu.co

(2) fpinilla@tecnocomfenalco.edu.co

(3) afernandez@tecnocomfenalco.edu.co

(4) dmunoz@tecnocomfenalco.edu.co

(5) lcruzs@tecnocomfenalco.edu.co

Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco
Cartagena, Colombia

Sistema Ciber-Físico¹ de una CNC para la producción de circuitos impresos

ABSTRACT

Keywords:

CNC; CPS; Cyber-physical Systems; Industry 4.0, Industrial Internet of Things

One of the most significant developments of electronic systems and their integration with information technology and communication trends, is represented by *Cyber Physical Systems* (CPS). The latter are associated with computer systems, which are closely related with: the physical world and its processes; provide and use at the same time, data access services and information processing, both available on the Internet; reconfigurability of control systems and processes; and in general with the characteristics of the *Internet of Things* (IoT), including industrial type or I²oT. First, CPS's depend on the newest and foreseeable future development of information technologies, and on the other hand, of the science and technology of their physical production. Thus, these are a fundamental part of what can lead to the fourth industrial revolution, which has been frequently identified as the Industry 4.0. This paper presents the design of a computerized numerical control (CNC) for manufacturing printed circuit boards and their integration with simulation, and with Cyber-physical system characteristics. Within the context of an automated electronic control, it was proposed visualize the behavior of the system from sensors and actuators connected to a data acquisition card, which interact with a 3-D display platform.

1. Sistema Ciber-físico o CPS, es un sistema computacional capaz de interactuar continuamente con el sistema físico en el que opera.

Fuente <http://cyberphysicalsystems.org/> Página oficial del Gobierno Alemán disponible en <http://www.bmbf.de/de/9072.php>

I. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Ciber-físicos (en adelante, CPS) son sistemas de entidades colaboradoras computacionales, que tienen estrecha relación con: el mundo físico y sus procesos en curso; proporcionar y utilizar al mismo tiempo, los servicios de acceso a datos y el tratamiento de la información, ambos disponibles en la Internet; la reconfigurabilidad de los sistemas de control y de los procesos; y en general, con las características propias del Internet de las Cosas (en adelante, *IoT*), incluidas las de tipo industrial (IIoT o I²oT) [1]. Algunos autores han considerado que es enorme el potencial de CPS para cambiar todos los aspectos de la vida; conceptos como los autos autónomos, la cirugía robótica, los edificios inteligentes, la red eléctrica inteligente, la fabricación inteligente y los dispositivos de implantes médicos, son sólo algunas de los ejemplos ya existentes [2], [11], [12], [13].

Por otro lado, la industria de la automatización industrial de hoy se enfrenta a enormes desafíos, tanto del mercado, como en el avance de las nuevas tecnologías en materiales, procesos y en la informática. Sumado a esto, los mercados requieren una flexibilidad sin precedentes para la reaccionar ante las fluctuaciones de la demanda y la oferta de recursos, traducidos en productos o servicios hacia el cliente final. Las nuevas tecnologías pueden hacer obsoletos los enfoques actuales respecto a las arquitecturas de los sistemas de producción y de automatización [7], [10].

La flexibilidad y la reconfiguración junto con la robustez y la eficiencia operativa de los sistemas de fabricación, se puede mejorar sustancialmente mediante el uso de las nuevas y avanzadas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). Las tendencias en TIC recientes, constantemente se asocian con IoT y con los mismos CPS. Instituciones académicas de alto impacto, las industrias y los gobiernos de todo el mundo desarrollan planes y estrategias para su desarrollo a largo plazo, entorno a estos términos. Por ejemplo, en Alemania¹ se ge-

neró el ambicioso programa denominado “Industry 4.0” que apunta a la creación de la cuarta revolución industrial. La principal promesa de la Industria 4.0 y otros conceptos similares, es la personalización masiva y la flexibilidad de los sistemas de producción [9], [14]. Por lo anterior, se requiere de cambios sustanciales en la fabricación de maquinaria, por ejemplo, máquinas modulares y reconfigurables más parecidas a robots inteligentes, aunque en su mayoría difieren de apariencia, si siguen un patrón en su comportamiento. Todo es preliminar implica a su vez, un control descentralizado y reconfigurable.

El concepto de IoT refleja la propagación de sensores y actores cada vez más “inteligentes”, que se comunican a través de redes cableadas e inalámbricas. Se prevé que casi todos las “cosas físicas” pueden conectarse y comunicarse, formándose el Internet de las Cosas. El principal impacto esperado del Internet en automatización y en la fabricación de productos, es la simplificación de diseños. La multitud de estándares de red y protocolos, la conexión de sensores y actuadores a los controladores y de los controladores entre sí, crea un montón de barreras en el intercambio de la información y complica la arquitectura del sistema. Tener cada sensor y actuador direccionables directamente mediante una dirección IP, permite el acceso transparente, sin importar las características de cada dispositivo.

La idea de los CPS proviene de la observación de que los salientes sistemas de control y de automatización, no se pueden diseñar desde la perspectiva de cualquiera de las tradicionales teorías del control, o de la ciencias de la computación pura, debido a que las nuevas dinámicas de los procesos físicos, pueden influir fuertemente en la propiedades computacionales de los sistemas informáticos y viceversa. El *software* es el “Corazón y el alma” de las TIC en general, y de todo dispositivo programable, en particular. Las tendencias de la IoT y CPS influyen en el software, por lo tanto se requiere un tipo de enfoque de re-diseño en el que las propiedades dinámicas del sistema se puedan considerar exhaustivamente, con la precisión requerida. Esto justifica el amplio uso de los modelos simulados sobre pla-

1. Página oficial del Gobierno Alemán disponible en <http://www.bmbf.de/de/9072.php>

taformas 3-D y de realidad virtual, en el diseño y la validación de sistemas.

Este documento se concentrará en principio en los cambios sustanciales de los sistemas de fabricación. Estos –comúnmente denominados de producción– tienen como objetivo principal reducir los inconvenientes de flexibilidad y los tiempos de respuesta en los actuales sistemas de automatización industrial, y se ven influenciados por las nuevas tecnologías emergentes. En efecto, en primera instancia se presentará un breve panorama de la evolución de las TIC y la fabricación. Luego, se mostrará una descripción global de las nuevas tendencias en la industria, simplificando el concepto de diseño de CPS, como base de una nueva revolución industrial. Finalmente la siguiente sección, se centrará en exponer un caso de estudio que sigue una de las metodologías impulsadas por las necesidades de flexibilidad y reconfigurabilidad en los CPS.

II. PASADO, PRESENTE Y FUTURO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

A. Evolución en la Interacción de las TIC y la fabricación

Si se ve a través de los desarrollos de las tecnologías computacionales TIC y la automatización de los sistemas de fabricación, se pueden evidenciar progresos en paralelo y estrechar muchas semejanzas (ver tabla 1).

El desarrollo de la informática llevó al Control Numérico sobre máquinas, herramientas y robots en donde los microprocesadores son el corazón de Control Numérico Computarizado (CNC). La aplicación de gráficos por computadora resultó en Diseños Asistidos por Computadora (CAD). El desarrollo de sistemas de fabricación se hace inimaginable sin redes de computadoras. La masiva cantidad de información de la Fabricación mediante los Sistemas Integrados por Computadora (CIM) se almacenan en bases de datos. Los nuevos resultados de la Inteligencia Artificial (IA) y las arquitecturas de control basadas en el “aprendizaje”, contribuyeron de manera significativa a los Sistemas Inteligentes de Fabricación (IMS) [8], [23]. A estos últimos pertene-

cen también los Sistemas Multiagente (SMA), Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS), Manufactura Fractal (FMS), Biónica (BMS), Genética (GMS), entre otras arquitecturas menos predominantes [7], [10], [20], [25], [26].

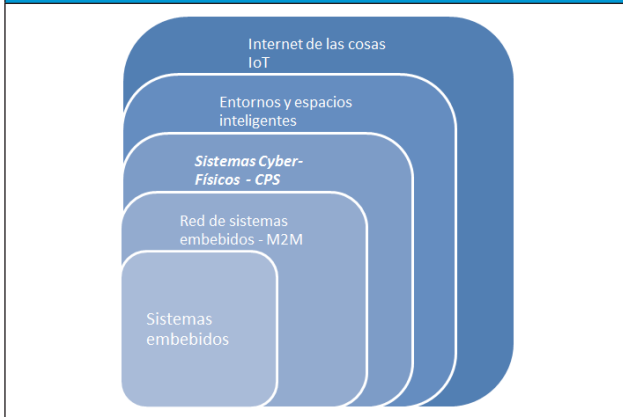
TABLA I. PARALELO DE TECNOLOGÍAS CON CONVERGENCIA HACIA CPS.

<i>Convergencia hacia Sistemas Ciber-físicos</i>	
<i>Ambiente Virtual</i>	<i>Ambiente Físico</i>
Control Numérico (NC)	Control Numérico Computarizado (CNC)
Computación gráfica	Diseño asistido por computadora (CAD)
Código gráfico para manufactura (G-Code)	Fabricación asistida por computadora (CAM)
Programas de optimización de ingeniería	Ingeniería asistida por computadora (CAE)
Manufactura integrada (IM)	Manufactura integrada por computadora (CIM)
Lógica difusa (Fuzzy) y redes neuronales (ANN)	Inteligencia artificial (IA)
Algoritmos Genéticos	Robótica evolutiva (RE)
Computación grid	Manufactura grid
Computación en la nube	Servicios de manufactura en la nube
Bioinformática	Biocomputación
Sistemas holónicos de manufactura (HMS)	Holón Recurso (HR)
Sistema multi-agente (SMA)	Agente
Sistemas inteligentes de manufactura (IMS)	Manufactura Fractal (FMS), biónica (BMS), genética (GMS)
Programación en tiempo real	Sistemas Embebidos

La Computación Grid conllevó a la Manufactura Grid, así mismo, la Computación en la Nube, resultó en Servicios de Manufactura en la Nube. La necesidad de desarrollar tareas específicas y la Computación en Tiempo Real trajo a luz a los Sistemas Embebidos. En efecto se generaron Sistemas de Servicios de Productos que evolucionaban mediante el uso de redes y sistemas interconectados o de Comunicación Máquina a Máquina (M2M) [24]. La evolución de estos últimos –las redes de sistemas embebidos– aportó significativamente a la comunicación inalámbrica, la red de sensores, y la nueva concepción de los Sistemas Ciber-físicos. Se espera que mediante los CPS se conciben entornos y

espacios cada vez más inteligentes, que desarrollen todas las características prevalecientes del IoT (ver fig.1).

Fig. 1. Evolución de los Sistemas Embebidos hacia el IoT [3].



Finalmente, los resultados de las Ciencias Computacionales y las TIC, sin duda, han estado contribuyendo de manera significativa al desarrollo de la fabricación; sin embargo, esto no se ha venido presentado en una sola vía, puesto que la importancia y la naturaleza altamente compleja de la producción han conllevado a nuevos retos y se han involucrado otras áreas del conocimiento [1], [14], [15], [19], [20], [21], [22]. Cuando se fija la mirada en este paralelismo enlistado (ver tabla 1), se puede observar una convergencia mutua, es decir, entre los mundos virtuales y físicos.

B. Desarrollos fundamentales de la Industria 4.0 [4]

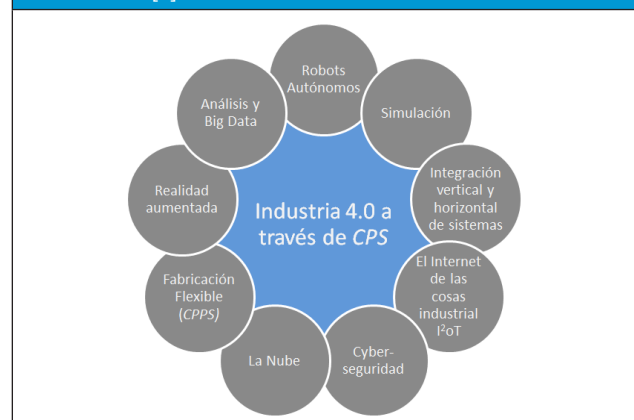
Los avances tecnológicos han impulsado el aumento considerado sobre la productividad industrial, desde los inicios de la Revolución Industrial. En principio, máquinas a vapor alimentaban fábricas en el siglo XIX, luego se presentó la electricidad que condujo a la producción en masa en la primera parte del siglo XX, y a continuación, la industria se automatizó en la década de 1970 con la implementación de sistemas electrónicos, generalmente programables. Sin embargo, en las décadas posteriores, los avances tecnológicos industriales sólo fueron graduales, en comparación con los avances que transformaron las TIC y el comercio electrónico. Ahora, como se enunció en la introducción de este escrito, los sistemas de fabricación se encuentran en medio de una cuarta ola de avance tecnológico, la Industria 4.0 que surge como transformación de la

nueva tecnología industrial digital, sustentada por nuevos avances tecnológicos [17].

En esta transformación, los sensores, las máquinas, las piezas, herramientas de trabajo y las TIC se conectarán a lo largo de la cadena de valor, más allá de una sola empresa. Estos sistemas conectados –ya anunciados como CPS– pueden interactuar entre sí, mediante protocolos basados en estándares del Internet y podrán analizar los datos para predecir errores, de la misma manera, se configurarán ellos mismos y se adaptarán a los cambios. Con la Industria 4.0 se hará posible el reunir y analizar datos a través de las máquinas, lo que permite procesos más rápidos, más flexibles y más eficientes para que se produzcan bienes de mayor calidad, a costos reducidos. Esto a su vez aumentará la productividad de la fabricación, impulsará la economía, el crecimiento industrial en todos los sectores, además de modificar el perfil de la fuerza de trabajo recurso humano [4], [29]; en última instancia, se generará un gran cambio de la competitividad de las empresas, regiones y países.

El *Bolton Consulting Group* (BCG) generó un informe que describe las tendencias de nueve tecnologías, como componentes fundamentales de la Industria 4.0 (ver fig. 2); allí se exploró sus posibles beneficios técnicos y económicos para los fabricantes y proveedores de equipos de producción [4], [15], [18]. De la misma forma, se han demostrado resultados similares, mediante estudios en varios países y en particular en Alemania, reconocidos como líder mundial en automatización industrial.

Fig. 2. Nueve avances de la tecnología que soportan la Industria 4.0 [4].



De los nueve fundamentos establecidos, sobresale la versión industrial del Internet de las Cosas la I²oT, que incluirá, entre otras características particulares, determinismo, fiabilidad y sincronismo. Es de resaltar que hoy en día, sólo algunos de los sensores y máquinas de un fabricante se conectan en red y hacen uso de las redes embebidas. Normalmente los dispositivos se organizan en una pirámide de automatización vertical, en la que los sensores, actuadores, controladores y demás componentes de automatización, están limitados a sistemas de control centralizados.

El I²oT permitirá que dispositivos de campo se comuniquen e interactúen entre sí, o con otros controladores según sea necesario. Lo anterior descentralizará el análisis y la toma de decisiones, lo que permite respuestas en tiempo real (real-time). Con I²oT más dispositivos –incluyendo incluso los productos no terminados–, se enriquecerán con la computación embebida y se conectarán utilizando tecnologías estándar. Un ejemplo es la empresa Rexroth de grupo Bosch, dedicada a la tecnología de control y accionamiento, que cuenta con una planta de producción de válvulas mediante un proceso de producción semiautomático y descentralizado [28]. Allí, los productos se identifican mediante códigos de identificación de radiofrecuencia, de esta forma las estaciones de trabajo se enteran y hacen seguimiento de que etapas de fabricación se deben realizar o faltan para cada producto, las cuales se pueden modificar o adaptar para realizar cambios específicos en la producción.

Otro pilar de Industria 4.0 que prevalece, tiene que ver con *Simulación*. En la fase de ingeniería, las simulaciones 3-D de productos, materiales y procesos de producción ya se utilizan, pero a futuro, también las simulaciones se utilizarán más ampliamente en operaciones de la planta. Estas simulaciones aprovecharán los datos en tiempo real para reflejar el mundo físico en un modelo virtual, que puede incluir las máquinas, los productos, y los seres humanos. Esto permite a los operadores probar y optimizar la configuración del equipo para el siguiente producto en línea –en el mundo virtual–, antes de

que se presenten cambios en físico, impulsando así los tiempos de configuración de la máquina y el aumento de la calidad. Por ejemplo, Siemens y un proveedor de máquinas alemán desarrollaron una máquina virtual que puede simular el mecanizado de piezas a partir de datos de la máquina física. Esto reduce el tiempo de preparación para el proceso de mecanizado real en hasta un 80 por ciento.

En general, la mayoría de los nueve avances en la tecnología ya se utilizan en la fabricación, pero con la Industria 4.0, los diferentes conceptos se integrarán y se transformará la producción. Lo anterior permitirá que se eliminen islas de automatización de los tradicionales sistemas jerárquicos; las células de producción se optimizarán y se reunirán como un todo, integrado, automatizado y optimizado el flujo de producción. Se espera que lo anterior conlleve a una mayor eficiencia y se cambien las relaciones de producción tradicionales entre proveedores, productores y clientes, así como entre el ser humano y la máquina.

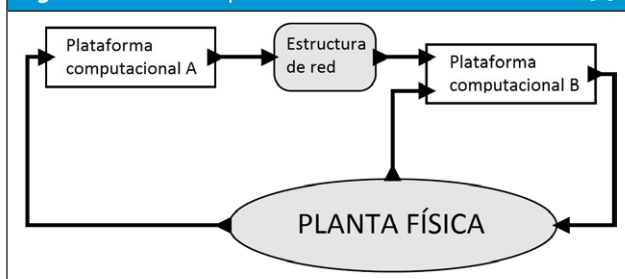
C. Los Sistemas Cyber Físicos, raíces y aplicaciones

Las aplicaciones de CPS incluyen la automatización, sistemas de manufactura, dispositivos médicos, sistemas militares, vivienda asistida, control y seguridad del tráfico, control de procesos, generación y distribución de energía, la conservación de energía, HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), aviones, la instrumentación, la gestión del agua sistemas, trenes, seguridad física (control de acceso y vigilancia), gestión de activos y la robótica distribuida (telepresencia, telemedicina) [23], [25], [26]. Como desafío intelectual, CPS es un concepto que se trata como la intersección, no de la unión, de la física y la cibernética. Combina modelos de ingeniería y métodos de la ingeniería electrónica, eléctrica, mecánica, ambiental, civil, biomédica, química, aeronáutica, industrial con los modelos y métodos de la informática. Varios autores sostienen que esos modelos y métodos no se combinan fácilmente y que la consecuencia CPS constituye una nueva disciplina de la ingeniería que exige sus propios modelos y métodos.

El término de “Sistemas Ciber-físicos” surgió en el 2006, y se lanzó por Helen Gillid de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NFS) [2], [27], [28].

El término relacionado como “Ciberespacio” se atribuye a William Gibson, que utiliza el término en la novela *Neuromancer*, pero las raíces del término CPS son mayores y más profundas. Es más preciso ver los términos “Ciberespacio” y “Sistemas Ciber-físicos” como derivado de la misma raíz, “Cibernética”, que fue expuesto por Norbert Wiener [2], un matemático estadounidense que tuvo un gran impacto en el desarrollo de la teoría de los sistemas de control. Durante la Segunda Guerra Mundial, Wiener fue pionera en tecnología de automatización con el objetivo de lanzar cañones antiaéreos. Aunque los mecanismos que utilizó no implicaban las computadoras digitales, los principios involucrados son similares a los utilizados en la actualidad, basados en la computación de sistemas de control de retroalimentados. Su lógica de control era efectivamente un cálculo, aunque llevado a cabo con circuitos analógicos y partes mecánicas, por lo tanto, la cibernética es la conjunción de los procesos físicos, el cálculo y las comunicaciones. Wiener deriva el término “*Κυβερνήτης*” o “*kubernites*”, que se refiere al control principal que controla la embarcación y significa timonel piloto o timón. La metáfora es apta para sistemas de control. En [2] se representa mediante una figura, la estructura simple de un CPS (ver fig. 4).

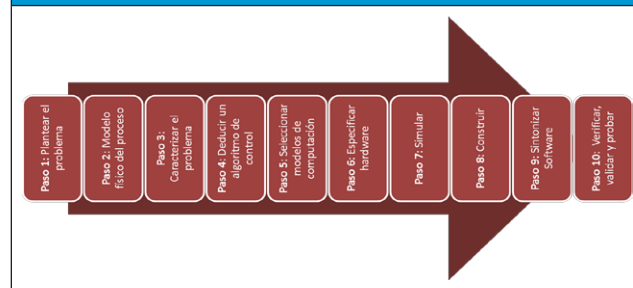
Fig. 3. Estructura simple de un Sistema Ciber-físico o CPS [2].



Los CPS se relacionan constantemente con M2M, IoT e Industria 4.0. Todos ellos reflejan la visión de obtener tecnologías que conecten todo nuestro mundo físico con el mundo de la información. El

término CPS se confunde a veces con la “Ciberseguridad”, que se refiere a la confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos y no tiene conexión intrínseca con procesos físicos. El término “Ciberseguridad”, trata de la seguridad del ciberespacio, y está por lo tanto, indirectamente relacionado sólo con la cibernética.

Fig. 4. Pasos de la metodología basada en modelos (MBD) [5].



Un CPS ciertamente implica muchos problemas de seguridad y privacidad desafiantes, pero no son las únicas preocupaciones. Se puede hablar de una “Teoría de CPS” de una manera similar a la “Teoría de Sistemas Lineales”, puesto que las dos tienen modelos, generalmente matemáticos. Los modelos juegan un papel central en todas las disciplinas científicas y de ingeniería. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de los CPS es que conjuga distintas disciplinas, y por desgracia, los modelos que prevalecen en estas disciplinas no se combinan bien, puesto que los lenguajes de modelado tienen disjuntos y semántica incompatibles.

D. Metodología de diseño para Sistemas Ciber-físicos [5], [6]

El diseño de un CPS, especialmente los de subsistemas heterogéneos distribuidos a través de redes, resultan ser una tarea exigente. Las técnicas de diseño comúnmente empleadas para CPS son sofisticadas e incluyen modelos matemáticos de sistemas físicos, modelos formales de cálculo, simulación de sistemas heterogéneos, la síntesis de software, verificación, validación y pruebas. Por lo anterior, se tiene que encontrar una serie de pasos secuenciales que, si se siguen cuidadosamente y correctamente, abarca cada una de estas técnicas de diseño, suficientes para el desarrollo de un CPS sencillo como complejo.

A modo de ejemplo, existe el *Diseño Basado en Modelos* o MBD [1], [5], [11], [12], [13], que hace hincapié en una serie de pasos para diseñar, analizar, verificar y validar los sistemas dinámicos (ver fig. 4), incluyendo la generación de modelos matemáticos. Un modelo completo de un CPS se desarrolla con el acoplamiento de su entorno, a los procesos físicos, y los cálculos embebidos. Los CPS pueden ser probados de forma simulada [4], lo que permite a los desarrolladores verificar la lógica de su aplicación, los supuestos sobre su entorno y la mayoría de las características de comportamiento.

En [6] se expone otra metodología –en estrecha relación con la MBD–, en la que se propone un conjunto de medidas, no necesariamente secuenciales, pero esencialmente co-dependientes, que facilitan la co-evolución de un modelo de un CPS en su realización (ver fig. 5). El siguiente capítulo se centra en la aplicación de esta metodología en la construcción de una máquina CNC de diseño propio, y se expone cada paso de manera somera, sin un vasto campo de investigación. Dado que la mayoría de veces un modelo jamás puede ser completo, una implementación práctica de esta metodología, sería realizar de forma iterativa cada paso hasta que se cumplan los requisitos de diseño [3], [5].

Fig. 5. Pasos de una metodología iterativa para el diseño de CPS [6].



III. CASO DE ESTUDIO: MÁQUINA CNC PARA FABRICACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS (PCB)

A. Paso 1: Investigación y Modelado

Las máquinas CNC a diferencia de otras máquinas convencionales o manuales, se utilizan mediante un sistema programable –generalmente una computadora– para controlar la posición y velocidad de motores que llevan a cabo los movimientos en los ejes de la máquina. Gracias a eso, se pueden

hacer desplazamientos que no se pueden lograr manualmente, tales como círculos, líneas diagonales y figuras tridimensionales complejas. Las CNC implementadas en la fabricación de *Circuitos Impresos* o PCB's (del inglés, *Printed Circuit Board*), tienen la capacidad de mover la herramienta en tres ejes a la vez. El movimiento se realiza de manera que se puedan ejecutar las trayectorias tridimensionales que se requieran, para que una fresa mecánica de 2 o 3 ejes, pueda quitar el cobre del sustrato en la baquelita del impreso. Una fresa para PCB's funciona de igual forma que un *plóter*, es decir, recibiendo comandos desde un algoritmo que controla el cabezal de la fresa, sobre los ejes X, Y y Z. Los datos del programa que controla la máquina son generados por el programa de diseño, además se almacenan en un archivo de formato tipo *Gerber* o *HPGL*.

Una vez que se programe la máquina para PCB's, ésta ejecuta todas las operaciones por sí sola, sin necesidad de que se maneje por un operador. Una computadora controla el movimiento de la mesa, el carro y el husillo (tornillo). En efecto y como se mencionó al final Capítulo I, el "corazón y el alma" de un dispositivo programable es su programa de instrucción, incluyendo el de las máquinas CNC. Por lo anterior, se hace necesario que estas máquinas programables cuenten con una estructura de control sólida, de forma que los operarios se puedan comunicar con la herramienta de manera eficiente. De hecho, tanto la *Estructura de Control* y la *Interfaz de Usuario*, como el tipo de *Comunicación*, son prioridad en la construcción de una máquina CNC para PCB. Habitualmente, la comunicación mediante el *Puerto Paralelo* sigue prevaleciendo en estas, dando paso a que los nuevos diseños opten por utilizar tecnología de *Bus Universal en Serie* (USB) [30]. Este trabajo tiene como objetivo presentar el desarrollo de un sistema CPS para la interacción de un proceso de mecanizado de PCB, a través de una *Interfaz Gráfica de Usuario* (GUI), mediante el uso del puerto de comunicación USB y la plataforma *LabVIEW*®.

B. Paso 2: Diseño y Simulación [6]

Periódicamente se cuenta con herramientas para el desarrollo de CPS en torno al concepto de

la *Programación Gráfica*. Se ha visto que expertos, con poco o nada de dominio en programación, han sido muy eficaces en la construcción de sistemas complejos, utilizando la una herramienta de programación gráfica como LabVIEW® [5]. El éxito de esto se atribuye al entorno de programación que se basa en *G-Code*, que posee abstracciones coherentes, conceptos claves de computación y una simple semántica. La herramienta desarrollada por *National Instruments*, cuenta con bibliotecas ricas en el acceso de periféricos I/O para procesamiento de señales. Los instrumentos para el diseño de CPS necesitan del respaldo de una plataforma robusta, que pueda incluir hardware, y que a su vez sea modular y reconfigurable. No todos los sistemas requieren tal adaptación, pero se hace esencial que en una plataforma de hardware CPS, se tenga que incluir componentes altamente reconfigurables. Se puede mencionar que la plataforma de hardware necesita ser tan flexible que se desaparece virtualmente, hasta el punto de que su comportamiento se define completamente por el software.

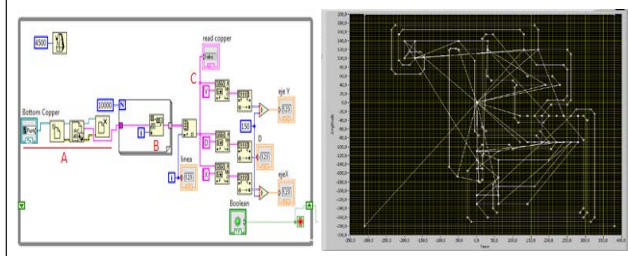
Otra herramienta de simulación gráfica que se implementa en este trabajo es Proteus®, que se encarga de generar los archivos Gerber luego de un diseño electrónico. Los archivos Gerber están compuestos por "rutas en código", que mediante la aplicación de LabVIEW®, se decodifican en "rutas y trazos" de las pistas del circuito. Los archivos que contienen estas rutas son llamadas "*Bottom Copper*" y "*Drill*", y se pueden almacenar como archivos comunes de texto (por ejemplo en extensión *.txt). El formato texto se interpreta por la aplicación mediante un proceso de lectura por líneas, y luego se usa una estructura para que se identifiquen cadenas de caracteres y se separen entre ellas. Posteriormente que se forma una columna, se dispone de una secuencia de variables que contiene las coordenadas de desplazamiento en cada uno de los ejes, que se ciñe bajo una estructura como en (1).

$$X + 6500Y + 6000D02 \quad (1)$$

De donde los números decimales después de la X, indican la posición en el eje X; los decimales después de Y, indican la posición de Y; y el comando

D02 le indica a la máquina si se taladra o no. La aplicación en LabVIEW® contiene el código gráfico de lectura-escritura y de separación de las funciones mediante una estructura *While* (ver fig. 6).

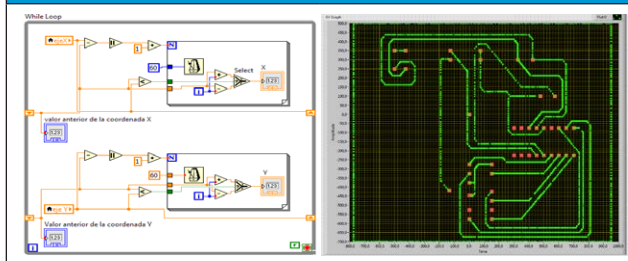
Fig. 6. Código gráfico en LabVIEW® para los trazos del PCB.



El bloque *path A* permite especificar la ruta del archivo de tipo texto externo (*.txt). Los bloques abrir, leer y cerrar *path*, permiten hacer modificaciones al archivo en la ejecución. Dentro del *path B*, La estructura *For* se ejecuta dependiendo del número de líneas del archivo y la función *Pick Line* incluida, permite que se tabulen las líneas y se puedan almacenar en un archivo (tipo texto) en un *Array* (arreglo o vector). El arreglo se descompone posteriormente en el *path C* mediante las funciones *String*, y se separa la información relevante. Los bloques indicadores X y Y del último *path*, muestran las coordenadas de la ruta, mientras que el indicador D define si la máquina perfora y sigue la ruta (D=1), o si esta sigue la ruta sin perforar (D=2).

Los primeros resultados de ejecución de ese programa se mostraron considerables, pero se presentaron dificultades en la visualización de las pistas (ver fig. 7).

Fig. 7. Mejora de la aplicación en LabVIEW® para los trazos del PCB.

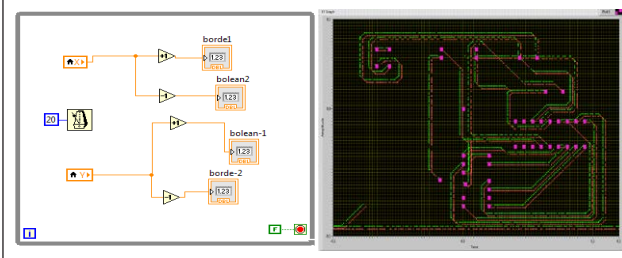


Esto se debió a que en la estructura del programa inicial no se ejecutaba cada ciclo *While* de forma instantánea. En efecto, se generaban "saltos" en

la gráfica cuando el archivo Gerber indicaba 2, en el bloque D (en donde no se debía trazar línea). La respuesta se pudo mejorar mediante una jerarquía anidada de *While*, es decir uno dentro de otro. Esto implicaba que en cada itinerancia de la estructura superior, se ejecutaba la estructura interna, y estos datos a su vez, se transmitían paralelamente hacia la gráfica, por medio de una variable local. Con lo anterior se logró el trazado natural de las pistas del PCB, condicionadas a un flujo de datos del bloque D (ver fig. 7).

La anterior estructura del programa en LabVIEW®, se modificó con el fin de mejorar su desempeño. El nuevo código se basó en comparar valores futuros con datos anteriores, para que se crearan líneas de puntos, a cambio de puntos unidos con (ver fig. 8). Visualmente el gráfico del circuito se aprecia correcto, sin embargo se debe resaltar que los trazos que representan la ruta del taladrado, deben seguir el contorno o el alrededor de las pista del PCB. La figura resultante muestra la estructura utilizada para generar un contorno de la pista principal, mediante la suma y resta que se forma de dos gráficas independientes.

Fig. 8. Aplicación en LabVIEW® para el contorno de los trazos del PCB.

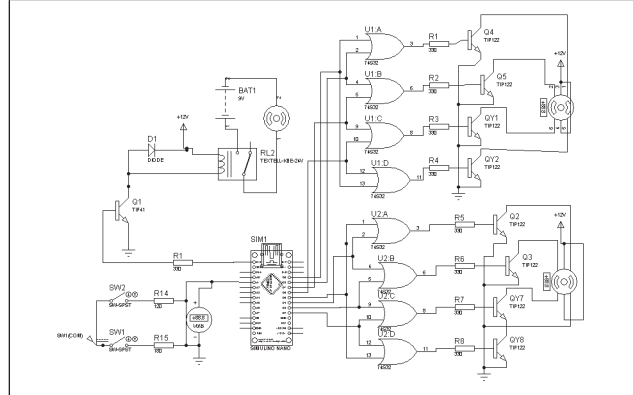


C. Paso 3: Verificación y Validación

Luego del diseño preliminar, se verificó el prototipo en una simulación de Proteus® a través de un driver para el control de los motores paso a paso (ver fig. 9). Este driver debía responder a las condiciones del código Gerber. El esquema del prototipo simulado cuenta con una placa Arduino® nano v3.0, que se encuentra equipado con el microcontrolador (o PIC) ATmega328 y el chip FTDI FT232RL para la comunicación USB. El PIC simulado se encargó de

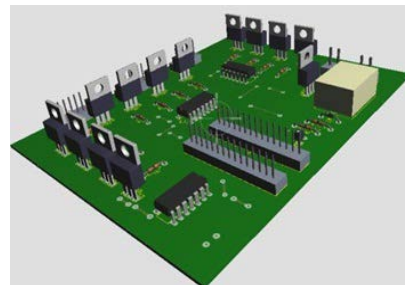
validar las operaciones de control y ejecución de tareas respecto al circuito en Proteus®.

Fig. 9. Circuito electrónico principal del driver para los motores de la CNC.



Luego de que se copile y se cargue el pseudocódigo en la representación simulada del controlador Arduino®, este interactúa con el resto del circuito. Una serie de pulsos eléctricos se envían en secuencias de paso simple, que mediante la operación de suma digital con compuertas OR, se hace una conversión a paso doble. A partir de las salidas de las compuertas se polarizaran los transistores TIP122 que acceden los motores que mueven los mecanismos en los tres ejes de la CNC. En caso de que los desplazamientos mecánicos lleguen a su límite de desplazamiento, se presentan interruptores finales de carrera al término de los extremos. La lógica de control evitar un desbordamiento en el mecanismo de los ejes puesto que se presenta un convertidor análogo-digital (ADC) basado en resistencias y el puerto del Arduino®. Mediante al simulación de ARES® de Proteus® se logró obtener la simulación del circuito físico (ver fig. 10), en donde se aproximó a realidad que facilitó su posterior fabricación.

Fig. 10. Simulación en Ares® del circuito de la CNC.



D. Paso 4: Fabricación

Una vez concretadas las simulaciones y validación de estas, se siguió con la creación física de PCB del circuito principal (ver fig. 11). La estructura mecánica de la CNC fue ensamblada siguiendo un bosquejo diseñado acorde a los alcances del driver creado, toda esta fue hecha a base de cartón prensado y partes metálicas para soportes.

Terminando la parte de hardware, se realizó el diseño final del software de control y su panel frontal de LabVIEW® (ver fig. 12). El aplicativo se constituyó de la comunicación, lectura de coordenadas y la ejecución de secuencia en los motores.

Fig. 11. Vista real del circuito principal de la CNC ensamblado en su PCB.

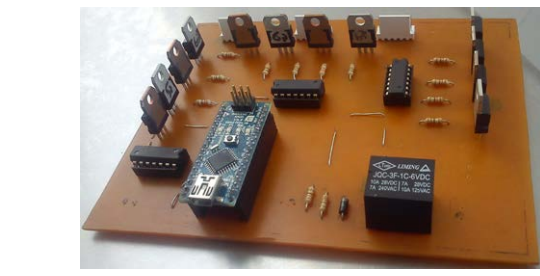
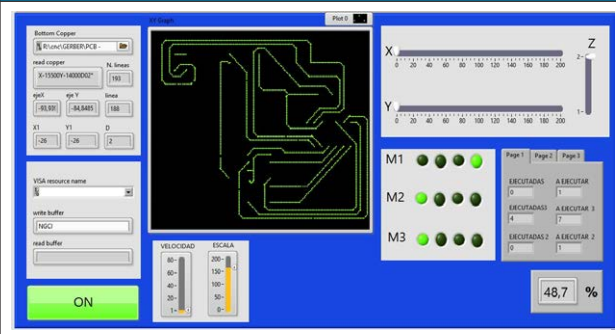


Fig. 12. Panel frontal en LabVIEW® de la CNC para la fabricación de PCB.



Se pueden establecer las variables de conexión mediante la estructura general de comunicación que se usó. Tal como la mayoría de dispositivos de conexión externos, se le puede configurar el puerto COM, la velocidad de transmisión de datos y el tiempo de entrada de datos. A esto le sigue la escritura y lectura del buffer. En la lectura de coordenadas, las figuras se crean en el software Proteus® donde finalmente se dibujan y posteriormente se exportan las rutas del diseño en código Gerber, para el funcionamiento de la CNC.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se destacó el desarrollo paralelo de los sistemas de fabricación y las TIC, además se señaló su influencia mutua. El concepto de CPS se introdujo en una palabra, y ha venido reuniendo las expectativas de las nuevas tendencias en la industria, como el Internet de las cosas industrial y la Industria 4.0. Se enumeraron algunas raíces y características de los CPS, basados principalmente en las contribuciones de los miembros de la Academia Internacional de Ingeniería de Producción (CIRP). Se resaltó que existen herramientas computacionales como LabVIEW®, Proteus® y Arduino® que apoyan la visión holística necesaria para el diseño y la creación de Sistemas Cyber Físicos. Mediante éstas, se ha demostrado que la creación de un prototipo virtual del software integrado y la creación de prototipos virtuales del entorno físico, son importantes para el desarrollo de una aplicación de control.

El presente trabajo mostró el desarrollo del diseño de un prototipo la interpretación del código Gerber, mediante una metodología y las tecnologías establecidas para el diseño de CPS. La aplicación selecciona la información requerida para el funcionamiento de una CNC, en la fabricación de un PCB. El programa se desarrolló en LabVIEW®, y se encargó de la toma de caracteres de tipo comentario, que se grafican y dan rutas de sección por sección del PCB en tiempo real. La gráfica resultante al simular las coordenadas obtenidas del archivo Gerber, se realizan con normalidad y buena calidad. Se debe resaltar que el archivo generado por la aplicación sólo entrega las pistas del PCB, que son inversas a las que se deben devanar por la broca de la CNC. Se espera continuar en la implementación de un prototipo final que genere automáticamente la trayectoria paralela (en contorno a las pistas) y cierre el polígono del devastado de cobre, de forma correcta.

AGREDECIMIENTOS

Esta investigación se ha financiado por la Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco Cartagena (Colombia), mediante el proyecto titulado "Mejora del Proceso para la Creación de Circuitos

Impresos desde el punto de Vista de la Técnica Operativa - Ambiental y Electrónica". Se da el más sincero agradecimiento al docente Lic. Álvaro Saladén Roa de la misma institución, por su apoyo dedicado en la revisión de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Monostori, L. Cyber-Physical Production Systems: Roots, Expectations And R&D Challenges. *Procedia CIRP* 17, 2014: 9-13.
- [2] Lee, E. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. *Sensors* 15.3, 2015: 4837-4869.
- [3] Wahlster, W. Industry 4.0: the semantic product memory as a basis for cyber-physical production systems. *SGAICO Forum: Recent Trends in Artificial Intelligence and Cognitive Science Zürich*. Vol. 27, 2013.
- [4] Boston Consulting Group. Industry 4.0 The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, in BCG perspectives, 2015. Available: https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/
- [5] Jensen, J. C., Danica H. Chang, and Edward Lee. A model-based design methodology for cyber-physical systems. *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*. IEEE, 2011.
- [6] Kornerup, J. A vision for overcoming the challenges of building cyber-physical systems. *National Science Foundation Workshop on Critical Physical Infrastructures*. 2006.
- [7] L. Cruz. And O. Rojas. "El futuro de la automatización industrial y el estándar IEC 61499". *Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), 2013 II International Congress of. IEEE*, 2014. ISBN-978-1-4799-7931-8.
- [8] (2014) IMS Projects, Website. Available: <http://www.ims.org/>
- [9] (2015) Página Oficial del Gobierno Alemán, Website. Available: <http://www.bmbf.de/de/9072.php>
- [10] L. Cruz y O. Rojas, "Comparación de enfoques de sistemas de control tradicionales y el paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura", *Proceedings of II International Congress Of Engineering Mechatronics And Automation (Ciima), 2013*, pp. 211-218, ISBN: 978-1-4799-2470-7.
- [11] N.N. Cyber-Physical Systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production. *Acatech Position Paper*, December 2011: 48.
- [12] N.N. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. *acatech Studie*, March 2012: 297.
- [13] N.N. Strategic R&D opportunities for 21st century, Cyber-physical systems, Connecting computer and information systems with the physical world. Report of the Steering Committee for Foundations and Innovation for Cyber-Physical Systems, USA, January, 2013: 24.
- [14] N.N. Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group, acatech, April 2013: 78.
- [15] Schuh G., Gottschalk S., Höhne T. High resolution production management, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2007; 56/1: 439-442.
- [16] VDI/VDE-Gesellschaft Mess und Automatisierungstechnik (GMA). *Cyber-physical systems: Chancen und nutzen aus sicht der Automation, Thesen und Handlungsfelder*, April 2013: 9.
- [17] Brettel M., Friederichsen N., Keller M., Rosenberg N. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Science, Engineering and Technology* 2014; 8/1: 37-44.
- [18] Hatvany J., The efficient use of deficient information, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2013, 32/1: 423-425.
- [19] Kádár B., Terkaj W., Sacco M. Semantic Virtual Factory supporting interoperable modelling and evaluation of production systems. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2013; 52/1: 443-446.
- [20] Van Brussel H., Wyns J., Valckenaers P., Bongaerts L., Peeters P. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry* 1998; 37:255-274.
- [21] ElMaraghy W., ElMaraghy H., Tomiyama T., Monostori L. Complexity in engineering design and manufacturing, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2012; 61/2: 793-814.
- [22] Monostori L., Csáji, B.Cs. Stochastic dynamic production control by neurodynamic programming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2006; 55/1: 473-478.
- [23] Schuh G. Smart logistics: Intelligent networked systems, *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 2006; 55/1: 505-508.
- [24] Frazzon EM., Hartmann, J., Makuschewitz, T., Scholz-Reiter B. Towards socio-cyber-physical systems in production networks. *Procedia CIRP* 2013; 7: 49-54.
- [25] Kopetz, H.; Bauer, G. The Time-Triggered Architecture. *IEEE Proc.* 2003, 91, 112–126.
- [26] NASA Engineering Safety Center. National Highway Traffic Safety Administration Toyota Unintended Acceleration Investigation, Technical Assessment Report NASA 2011. Available online: <http://www.nhtsa.gov/UA>.
- [27] Koopman, P. A Case Study of Toyota Unintended Acceleration and Software Safety, 2014. Available online: <http://betterembsw.blogspot.com/2014/09/a-case-study-of-toyota-unintended.html>.
- [28] (2014) Empresa Rotch del grupo Bosch, Website. Available: <http://www.boschrexroth.com/en/xc/trends-and-topics/industry-4-0/connected-industry-1>
- [29] Catalán C., Félix S. and Alfonso B. Industria 4.0 en el Grado de Ingeniería Electrónica y Automática. In *Actas de las XXI Jornadas de la Enseñanza Universitaria de la Informática*, 2015.
- [30] Aguillón A., Gustavo Andrés, and Mendoza C. Rediseño y optimización del sistema de posicionamiento bidimensional aplicado a la perforación de circuitos impresos, 2013: 18.