

Configurable Hybrid Integral Manufacturing Platform: Subtractive-Additive Process with Industrial Robot Arm, Proof of Concept Results

Oscar Molotla-Garcés , Mario Peña-Cabrera  and Victor Lomas-Barrie 

Abstract—In accordance with the new trends demanded by Industry 4.0, the idea of having manufacturing processes using industrial robotic arms with capabilities and functionalities to achieve reconfigurable and adaptable production, has become a novel research field. A new concept to have different manufacturing tools integrated and controlled by the same system arises, this new idea allows the implementation of integrated hybrid systems for manufacturing process purposes. In the last decade, the three-axis hybrid manufacturing has become a viable or promising option to cover these new needs, it shows the feasibility of achieving applications that combine additive and subtractive methods. However, it is still a challenge to implement this new concept with robotic arms aid manufacturing. This article presents an overview of developed systems using this hybrid integral approach up to now, which focuses on subtractive and additive manufacturing methods of 3D printing using robotic arms. The objective of this research, is to show the possibility of such approach to be develop as an integral manufacturing platform with an industrial robotic manipulator as the central element and a hardware-software synergy concept, which allows the implementation of an integral hybrid manufacturing platform having different tools controlled by a unique system. The system allows to integrate others working production tools such a laser cutting device, just by way of attach the specific hardware and CAD/CAM design for the desired manufacture piece. Once the requirements and necessary components to develop the integral hybrid manufacturing platform have been established, a case of study for additive-subtractive manufacturing is presented. A proof-of-concept experiment is proposed and realized to demonstrate the manufacturing quality challenges that a system such as the one shown must face.

Index Terms—Additive manufacturing, subtractive manufacturing, hybrid manufacturing, industrial robotic arm, embedded electronic systems, integral platform, hardware software synergy.

I. INTRODUCCIÓN

Desde la aparición del robot industrial, el mundo tecnológico ha sido cautivado con la idea de contar con sistemas robóticos con capacidades de percibir su entorno, procesarlo y realizar acciones de forma racional, correcta y maximizando los resultados esperados; con un enfoque de manufactura avanzada, se convierten en agentes autónomos con capacidad de realizar cualquier tarea encomendada [1]. Sin embargo, en décadas pasadas se han utilizado para realizar

solo tareas básicas o repetitivas. Con la llegada de la cuarta revolución industrial (I4.0) [2], la fabricación en un entorno digital adquiere mucha importancia, de tal manera, que los robots industriales tiene que adecuarse a estas circunstancias para adaptarse a funciones de fabricación más personalizadas [3], y están evolucionando para tener una utilidad mayor y abordar tareas mas complejas, para ser más autónomos, flexibles y cooperativos.

Este incremento de robots en las fabricas se ve reflejado dentro de la I4.0. ya que una de las áreas con mayor presencias de desarrollo son las soluciones de manufactura avanzada [4], en donde es necesario tener robots industriales colaborativos con sensores e interfaces estandarizadas [5]. En los últimos años, una de las principales áreas de aplicación que ha mostrado un incremento considerable en los brazos robóticos industriales, es la manufactura sustractiva de materiales blandos, como corte, esmerilado, devastado, pulido y fresado, tanto ha sido el impacto, que en la última década ha pasado de ser un tema de investigación a una tecnología de producción de uso industrial [6]. Sin embargo, es necesario considerar otros factores además del técnico, como el social, el económico y el impacto ecológico que las manufacturas del futuro tienen que tomar en cuenta. Dentro de los aspectos técnicos están la integración de los sistemas, los dispositivos utilizados, la seguridad y el análisis de datos entre otros, en lo económico está la duración del mercado y los costos de fabricación, operación y entrenamiento, respecto de lo social hay que considerar el apoyo a comunidades, la disponibilidad de insumos en las localidades y los recursos humanos, así como el impacto ecológico global y en las comunidades.

Entre los beneficios que se tienen al utilizar brazos robots en aplicaciones de maquinado, son una alta flexibilidad a un menor costo en comparación con las maquinas CNC [7] que incrementan sus costos por mucho al añadir uno o dos ejes adicionales en sus procesos. Otra ventaja de los centros de mecanizado robótico, es que el manipulador tiene la capacidad de cambiar fácilmente la orientación de la herramienta y colocarla casi en cualquier punto que se requiera. Un ejemplo de esto, es que los robots pueden procesar formas 3D de gran tamaño o complejas y proporcionar un espacio de trabajo más extenso, el que se puede ampliar fácilmente agregando un eje extra al mismo [8]. Con la mejora progresiva de la rigidez y la precisión en los robots industriales [9], el maquinado con los mismos tiene un gran potencial para sustituir o complementar el realizado por las máquinas tradicionales [6].

En los últimos años, la fabricación aditiva ha pasado de ser

Oscar Molotla, Universidad Nacional Autónoma de México e-mail:oscar.molotla@comunidad.unam.com

Mario Peña, Universidad Nacional Autónoma de México e-mail:mario.penia@iimas.unam.mx

Victor Lomas-Barrie, Universidad Nacional Autónoma de México e-mail:victor.lomas@iimas.unam.mx

una industria en desarrollo a una tecnología verdaderamente convencional, tal es su importancia que se incluye dentro de las nueve tecnologías de la I4.0 [4], [10]. La manufactura aditiva a mediana y gran escala es un campo de investigación que está iniciando y aún es considerada una tecnología de laboratorio con algunas aplicaciones desarrolladas en la actualidad [11].

Básicamente una impresora 3D convencional, se comporta como una fresadora CNC vertical intercambiando el cortador de la máquina por un cabezal que realice la deposición de plástico [12]. La limitación de este tipo de impresoras, consiste en la restricción de sus movimientos, ya que al contar solo con tres grados de libertad, los desplazamientos del extrusor se limitan a los ejes coordenados x , y y z , impidiendo también, que el cabezal pueda girar para imprimir en diferentes planos, generando un estricto enfoque de fabricación capa por capa, creando objetos con un efecto tipo escalón [13]. Otra limitante de la mayoría de las impresoras 3D, es la restricción que se tiene en cuanto a las dimensiones de la plataforma de fabricación, ya que dependiendo de la forma y las dimensiones del objeto a imprimir, es posible que se requieran estructuras de soporte, lo que aumenta el tiempo de manufactura, el consumo de material y los costos de fabricación [14].

Como solución a esto, se han reportado algunos sistemas de fabricación aditiva a mediana y gran escala basados en brazos robóticos industriales [15], [16], ya que estos tienen la capacidad de fabricar estructuras más grandes y el espacio de trabajo para imprimir se amplía en gran medida. Otra ventaja de utilizar los brazos robóticos, es su alto grado de libertad, lo que les permite realizar movimientos en varios planos y no en uno solo como lo hacen las impresoras 3D convencionales que realizan capas planas de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo [12]. El uso combinado de robots industriales y la tecnología de fabricación aditiva, ofrecerá la posibilidad de lograr una impresión multicapa y la manufactura de geometrías complejas en diferentes planos de fabricación [16].

Se considera un sistema de fabricación híbrido, aquel que integra dos o más procesos diferentes de fabricación en una misma celda de manufactura y con la finalidad de combinar sus ventajas al tiempo que minimiza sus limitaciones e inconvenientes. En una fabricación híbrida, es posible que los procesos funcionen simultáneamente o de forma independiente, pero deben ser efectuados por la misma máquina [17]. Los procesos híbridos desarrollados hasta ahora por máquinas CNC, que en su mayoría combinan métodos aditivos y sustractivos, muestran tener un gran potencial para mejorar la calidad en la fabricación de los mismos, pero como ya se ha mencionado, estas máquinas carecen de flexibilidad debido a que solo cuentan con tres ejes y esto limita la capacidad de sus movimientos, por lo que la integración de brazos robóticos para desarrollar procesos híbridos aditivos y sustractivos, podría aumentar la adaptabilidad y flexibilidad del espacio de trabajo, y por lo tanto, brindar nuevas oportunidades de fabricación [17].

El artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta una investigación de los sistemas de manufactura híbrida desarrollados en la actualidad, basados en brazos robóticos. En la sección 3, se plantea el concepto y la propuesta de una nueva plataforma integral que respalde el proceso de manufactura híbrida utilizando un brazo robótico

como elemento central y la estructura de su desarrollo. La sección 4 muestra los elementos base que incorpora este nuevo sistema y el planteamiento para su integración, hacia la parte final, se presenta un caso de estudio que permite resaltar e identificar las ventajas de una plataforma de manufactura integral híbrida, basado en una serie de pruebas que ponen a demostración este novedoso concepto y se discuten los resultados alcanzados. Por último se muestran las conclusiones y el trabajo futuro a desarrollar.

II. TRABAJO PREVIO

A pesar de las ventajas inherentes de flexibilidad y adaptabilidad que brinda el emplear brazos robóticos en procesos de manufactura, en la literatura solo se reportan algunos casos de estudio sobre el desarrollo de procesos híbridos con enfoque en métodos sustractivos y de impresión 3D. Uno de los sistemas reportados, es el desarrollado por Keating y Oxaman [3] (caso 1), que proponen una Plataforma Robótica multifuncional de fabricación compuesta basada en un brazo robótico KUKA. En el trabajo se abordan tres tipos de fabricación: sustractiva, formativa y aditiva, esta última es conformada por tres efectores finales, el primero de ellos está basado en un cabezal de impresión 3D tradicional, en el segundo cabezal se exploró la impresión 3D de plástico a través del reciclaje directo de polietileno de alta densidad y finalmente para lograr imprimir piezas de mayor tamaño, implementaron un cabezal para la deposición de espuma de etano. En la fabricación formativa se empleó como el material de grabado arcilla y un indentador o pulsador como herramienta para esculpir. La fabricación sustractiva se realizó con fresado de 3 ejes a través de un rauter portable y también se exploró el fresado de varios ejes. Finalmente utilizaron la combinación de procesos aditivos y sustractivos, en donde se empleó de forma secuencial la fabricación compuesta de un objeto. En la Fig. 1 se muestran algunos de los procesos realizados.

Otro de los sistemas que se reportan en esta área, es el desarrollado por los investigadores de la universidad de Illinois (USA) [17] (caso 2), donde a través de una plataforma de manufactura basada en un brazo robótico desarrollan manufactura híbrida, combinando como herramientas de fabricación dos cabezales intercambiables, uno basado en extrusión y otro en fresado. Su objetivo fue estudiar las capacidades y el potencial de la manufactura híbrida, empleando para ello una serie de estudios que evalúan las siguientes características: el ajuste dinámico de la dirección del eje de la herramienta, el análisis de la calidad de la superficie, el procesamiento multiplano, la capacidad para evitar colisiones y la reducción del desperdicio de material y tiempo de producción. Para realizar los estudios mencionados, los investigadores de Illinois desarrollaron un nuevo software con cuatro objetivos particulares: planificar los procesos, controlar el cabezal sustractivo y el aditivo, control de la ruta de impresión a través del driver del robot y establecer la comunicación entre los cabezales y el controlador del robot. En la Fig. 2 se muestran algunos de los procesos realizados a través de esta plataforma.

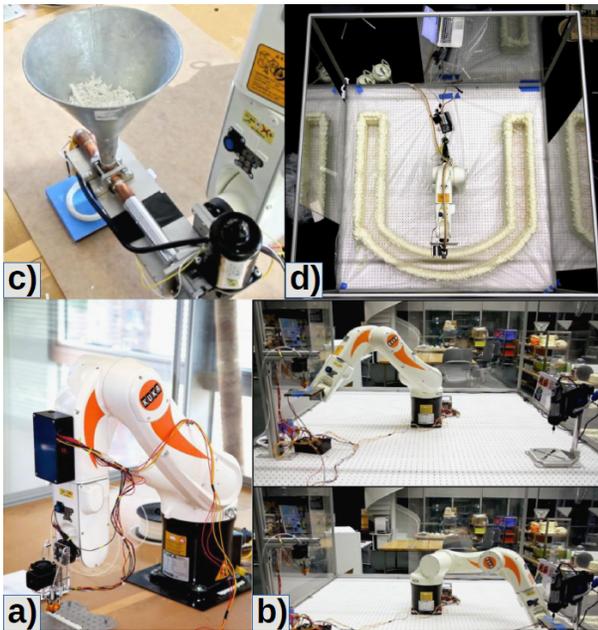


Fig. 1. (a) Impresión 3D con cabezal tradicional, (b) Plataforma para manufactura aditiva y sustractiva, (c) Impresión 3D a través del reciclaje de polietileno de alta densidad, (d) Impresión 3D con deposición por espuma de etano [3].

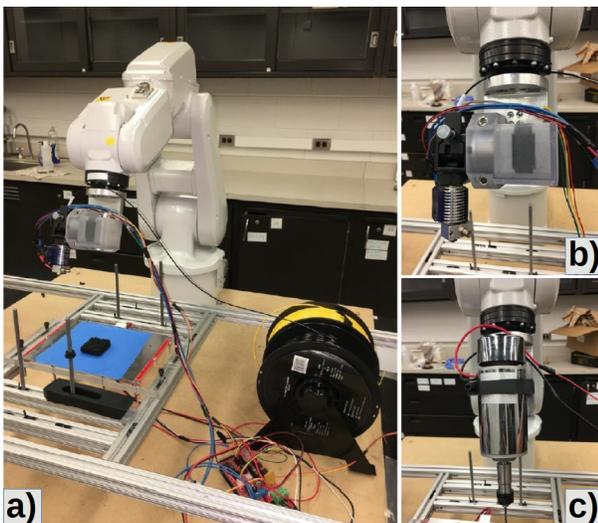


Fig. 2. (a) Plataforma de Manufactura, (b) Cabezal aditivo, (c) Cabezal sustractivo [17].

III. PROPUESTA DE PLATAFORMA DE MANUFACTURA HÍBRIDA INTEGRAL (PMHI)

En las investigaciones reportadas, no se considera el desarrollo de una plataforma que integre ambos procesos de manufactura en una misma estructura de software y hardware que respalde su funcionamiento. En la Fig. 3 se muestra la plataforma de manufactura integral híbrida propuesta por nosotros.

Para implementarla, es necesario desarrollar en ambos cabezales sistemas electrónicos embebidos (SEE) y programación, con una misma arquitectura, consiguiendo así, una sinergia entre hardware y software necesaria para la im-

plementación tanto de manufactura aditiva como sustractiva en el mismo robot, que soporten el funcionamiento integral de la plataforma de manera independiente, y no en una estación de trabajo para cada proceso como lo hacen Keating y Oxaman, mientras que los investigadores de Illinois realizan una aproximación de procesos independientes al utilizar una tarjeta de desarrollo Arduino Mega para operar el cabezal aditivo y en el sustractivo emplean un driver para variar la velocidad del spindle. Otro aspecto que se considera en nuestra propuesta es emplear una interconexión hacia el robot y los cabezales, ya que en la literatura revisada solo se establecen conexiones alámbricas hacia los mismos, por ejemplo una conexión ethernet hacia el robot y una vía USB con los cabezales.

Implementar la PMHI en un robot KUKA KR 5 con un alcance de 1423 [mm] [18], fue una elección para mostrar también la manufactura de objetos mas grandes ya que solo se han reportado casos de impresión o sustracción a pequeña escala empleando brazos robóticos con un alcance máximo de 850 [mm], lo que limita tanto la flexibilidad del espacio de trabajo como el alcance del mismo al implementar los dos procesos. Otro punto a resaltar en los trabajos previos, es que la manufactura sustractiva no es empleada a fondo o de forma independiente, y es utilizada solo como un proceso de acabado superficial o formativo y no como la manufactura de una pieza mediante un proceso sustractivo completo e independiente. En la Fig. 4 se muestra un esquema de las variables involucradas en la plataforma para definir un análisis multivariable, con el que se pretende establecer métricas, definiciones y predicciones del comportamiento del sistema, y las relaciones entre las variables definidas como una combinación lineal, la descripción de un método o sistema en el que se puedan definir más de dos variables, hace posible utilizarlo para su mejor comprensión y esclarecimiento de su contenido. En el artículo se presentan y de manera cualitativa las variables involucradas, es por ello que sugerimos que para realizar un tipo diferente de manufactura con la PMHI ya sea aditivo, sustractivo u otro, solo basta con realizar un cambio de modulo (Cabezal/SEE) y generar un nuevo diseño de manufactura en el software CAD/CAM, como se plantea en el apartado pruebas de experimento conceptual.

Donde R representa al Robot KUKA, driver KRC4 y Smartpad que contiene el software de programación KUKA Sistem Software (KSS), C el cabezal que puede estar integrado por elementos de hardware como sensores o actuadores etc. H el hardware o los chips en los que se basa los SEE, P la programación tanto de la interconexión de la plataforma basada en Python, HTML, PHP y Apache como de los chips a emplear en los sistemas embebidos y S el software CAD/CAM, necesario para diseñar la pieza, configurar parámetros finales de manufactura en el robot y generar el código con las trayectorias de corte o adición.

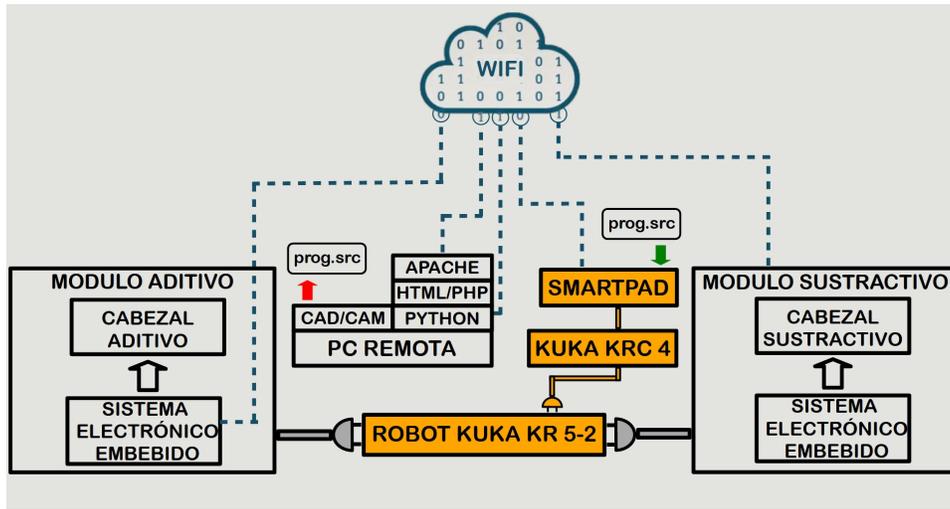


Fig. 3. Diagrama de la Plataforma de Manufactura Híbrida Integral (PMHI)

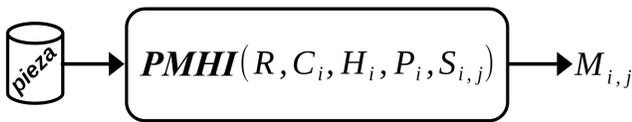


Fig. 4. Esquema de las variables utilizadas en la PMHI

$$C_1 \begin{cases} H_1, P_1, S_{11} \\ H_1, P_1, S_{12} \\ H_1, P_1, S_{13} \\ \vdots, \vdots, \vdots \\ H_1, P_1, S_{1j} \end{cases}, C_2 \begin{cases} H_2, P_2, S_{21} \\ H_2, P_2, S_{22} \\ H_2, P_2, S_{23} \\ \vdots, \vdots, \vdots \\ H_2, P_2, S_{2j} \end{cases}, \dots, C_i \begin{cases} H_i, P_i, S_{i1} \\ H_i, P_i, S_{i2} \\ H_i, P_i, S_{i3} \\ \vdots, \vdots, \vdots \\ H_i, P_i, S_{ij} \end{cases}$$

donde i es el número posibles de cabezales y j el número de manufacturas producidas o piezas a desarrollar, obteniendo que:

$$PMHI(R, C_i, H_i, P_i, S_{ij}) \longrightarrow M_{ij}$$

En la tabla I se muestra una comparativa entre los trabajos previos realizados (caso 1 y 2) y la Plataforma Híbrida de Manufactura Integral propuesta en este artículo. Resaltando las principales características de cada caso de estudio.

IV. PRUEBAS DE EXPERIMENTO CONCEPTUAL

La industria 4.0, está teniendo un gran impacto en la manufactura, los sistemas utilizados, necesitan interactuar con el entorno, comunicarse con objetos (IIoT), con otras máquinas y con personas; para lograr esto, tienen que actuar como agentes inteligentes con capacidades y habilidades de aprendizaje con alto valor agregado y contar con sensores, actuadores y sistemas electrónicos y computacionales que puedan tomar decisiones. Entre los pilares que se definen para la I4.0 están la manufactura aditiva y la robótica, por ello, es novedoso investigar en el desarrollo de sistemas de manufactura integrales híbridos que utilicen brazos manipuladores antropomórficos que puedan emular el comportamiento humano tanto en sus habilidades físicas, como en sus habilidades de aprendizaje de

TABLA I
TABLA COMPARATIVA

Tabla comparativa de manufactura híbrida basada en brazos robóticos

Características	Caso 1 [3]	Caso 2 [17]	Caso 3 (PHMI)
Manufactura Aditiva (MA) independiente	X	✓	✓
Manufactura Sustractiva (MS) independiente	X	✓	✓
Módulos intercambiables	X	✓	✓
Interconexión inalámbrica a los módulos	X	X	✓
Interconexión inalámbrica al robot	X	X	✓
Hardware reconfigurable modulo aditivo	X	X	✓
Hardware reconfigurable modulo sustractivo	X	X	✓
Alcance máximo del robot	850 [mm]	585 [mm]	1423 [mm]

conocimiento. Para la realización de un experimento que lleve a conclusiones de valor en este sentido, se necesitan tomar en cuenta factores técnicos, sociales, económicos y de impacto ecológico. El experimento realizado en esta investigación, utiliza una plataforma con una misma arquitectura en hardware-software que soporta dos modalidades de herramientas para realizar manufactura aditiva y sustractiva, el enfoque para la prueba de concepto establecido, utiliza piezas simples pero que muestren la capacidad de seguir trayectorias complejas, se escogió la manufactura de un cilindro y con ello registrar las métricas necesarias.

Con base a la experiencia previa en procesos de manufactura con brazos robóticos, se diseñó un experimento de prueba de concepto a mediana escala en ambos cabezales, para lo cual se consideraron diversas alternativas, seleccionando la manufactura de un cilindro, ya que tanto para la fabricación aditiva como sustractiva, imprimir o cortar una circunferencia

supone un reto de precisión y repetibilidad en ambos casos. Por otro lado, es posible realizar un proceso semejante de manufactura tanto por el cabezal sustractivo como aditivo y realizar una comparación de los mismos. También sera posible comprobar el desarrollo de la fabricación a mediana escala con la plataforma integral híbrida, lo que permitirá explorar posibles fallas y mejoras en ambos procesos. Se descartó la fabricación de alguna otra pieza mas compleja, ya que complicaría la configuración experimental para esta prueba de concepto, y el objetivo principal es mostrar la factibilidad, simplicidad y volumen de fabricación mas que la precisión.

Para este caso de estudio, el diseño del cilindro se realizó en el software Mastercam, donde se generan los modelos 3D de las piezas a manufactura y a través de Robotmaster se establecen las configuraciones finales de manufactura, que generan el programa con las trayectorias de movimientos a cargar en el robot, mismas que establecerán los procesos aditivos y sustractivos. El brazo robótico industrial está formado principalmente por tres elementos; el robot de 6 grados de libertad, el controlador o driver del mismo y el SmartPAD, que tiene todas las funciones de operación y visualización requeridas para manipular y programar el robot.

A. Sistemas Electrónicos Embebidos

Con la finalidad de establecer la plataforma integral con hardware reconfigurable, se emplean módulos intercambiables e independientes, basados en un SEE de diseño propio, que proveen de total autonomía a cada cabezal, en la Fig. 5 se muestra un diagrama del mismo. Los sistemas embebidos se diseñaron y desarrollaron basados en los requerimientos de cada cabezal y eligiendo la misma estructura para ambos, esto con el propósito de establecer un modelo o patrón en los mismos.

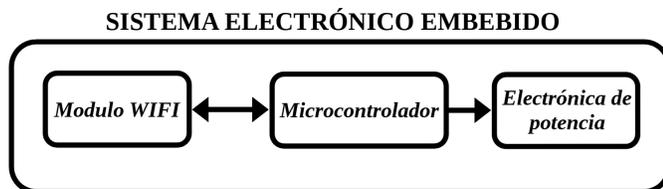


Fig. 5. Diagrama a bloques del sistema electrónico embebido

Con el objetivo de generar módulos inalámbricos, se implementa una comunicación remota con los sistemas electrónicos embebidos, mediante el chip ESP8266 [19] con conexión Wi-Fi encargado de enviar y recibir los datos procesados del cabezal a la computadora central. Como segundo elemento se tiene el dsPIC30F4011 [20], que gestiona los periféricos necesarios del cabezal y establece una comunicación serial con el módulo WiFi. En la Fig. 6 se muestra el diseño e implementación del SEE desarrollado.

Debido a que los voltajes y corrientes en los dispositivos de potencia de los módulos son de mayor magnitud que las utilizadas por el microcontrolador, se emplea una etapa de acondicionamiento, amplificación y aislamiento entre las señales digitales y las de potencia. Dado los requerimientos de cada cabezal, se desarrolla la electrónica de potencia

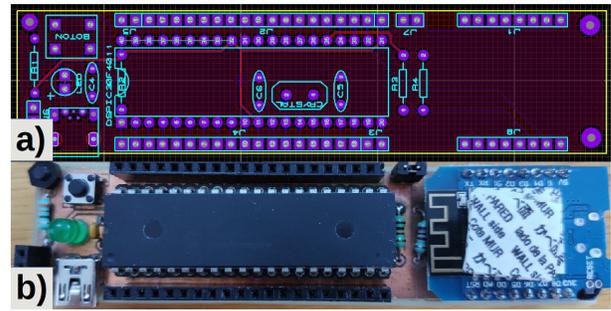


Fig. 6. (a) diseño de circuito impreso, (b) sistema electrónico embebido desarrollado

necesaria, para implementar tanto la manufactura aditiva como sustractiva.

B. Módulo Aditivo

Para esta primera aproximación del módulo aditivo se considero seleccionar el hotend y extrusor por separado. Con el propósito de ensamblar un cabezal de diseño propio, que se muestra en la Fig. 7, seleccionamos los elementos de acuerdo a los requerimientos de esta prueba de concepto como un bloque calefactor con la capacidad de extruir mayor filamento y aumentar el volumen de impresión. Por su parte, se eligió un extrusor que presenta un accionamiento por doble engrane, proporcionando así, la potencia de empuje necesaria para impresiones de gran volumen y con la capacidad de añadir boquillas de mayor diámetro. Se realizó la impresión de cinco piezas, dos para ensamblar el motor a pasos, extrusor, disipador, hotend y ventiladores, una tercera para colocar el cabezal sobre la brida del brazo robótico y finalmente 2 para añadir el carrete de filamento en el robot.

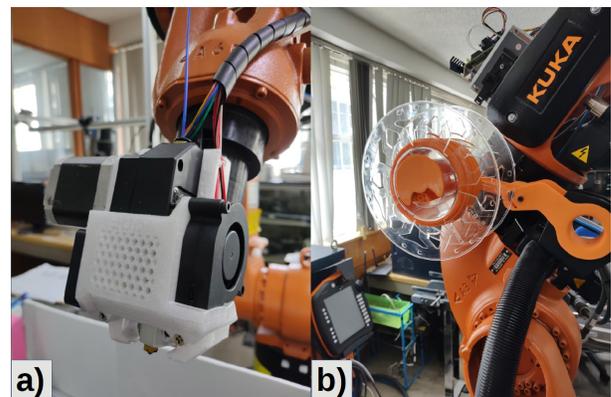


Fig. 7. (a) Cabezal aditivo ensamblado con las piezas impresas en 3D, (b) Carrete de filamento y soporte impreso en 3D

Por su lado el sistema electrónico de potencia para el cabezal aditivo que se observa en la Fig. 8, esta constituido en dos principales bloques, el que permite controlar el motor acoplado al extrusor, mediante el integrado A4988 del fabricante ALLEGRO [21], que ha sido desarrollado para operar motores a pasos bipolares, en cinco diferentes modos de paso. Por otro lado, para fijar la temperatura en el bloque calefactor, se controló la potencia disipada por la resistencia térmica a través de un arreglo de transistores.

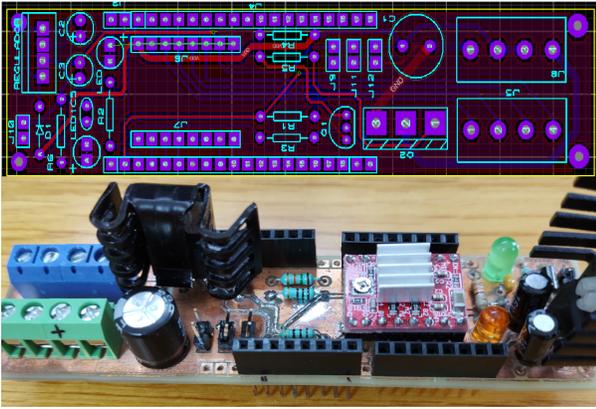


Fig. 8. Sistema electrónico de potencia para manufactura aditiva

C. Módulo Sustractivo

Para el cortador o spindle del modulo sustractivo, se consideró buscar un equilibrio entre potencia y peso, esta ultima característica con la finalidad de no comprometer las especificaciones para garantizar el correcto funcionamiento de cinemática y repetibilidad del brazo robótico, ya que en la brida no se puede exceder un peso superior a los 5 [kg]. Después de considerar diversas alternativas se eligió un spindle con un voltaje de operación a 100 [Vdc], 800 [W] de potencia, velocidad máxima 20000 [RPM] y un peso de 1.5 [kg]. Se imprimió una pieza en 3D para ensamblar le spindle en la brida del brazo, en al Fig. 9 se muestra el mismo.

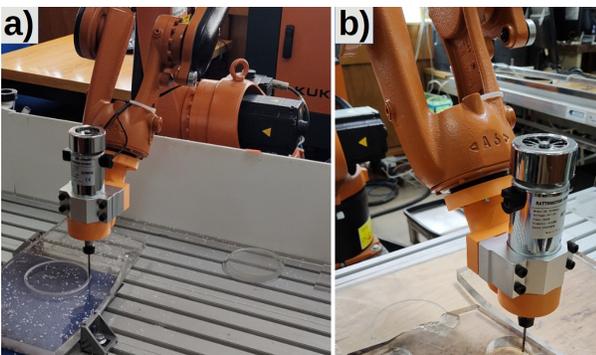


Fig. 9. (a) Cabezal sustractivo, (b) soporte impreso en 3D ensamblado al Spindle y al brazo robótico

El driver desarrollado para variar la velocidad del spindle, que se muestra en la Fig. 10, se conforma por una primera etapa de acondicionamiento, amplificación y aislamiento, implementada a través de una serie de optoaisladores que acondicionan las señales PWM enviadas por el dsPIC para ser transmitidas a la etapa de potencia conformada por un puente H basado en MOSFETs.

D. Interconexión de la Plataforma de Manufactura Híbrida Integral (PMHI)

La interconexión de la plataforma establece un puente inalámbrico entre los sistema embebidos de cada modulo, el robot y la computadora central, en la Fig. 11 se presenta una diagrama a bloques de la misma. Para generarla, se emplea

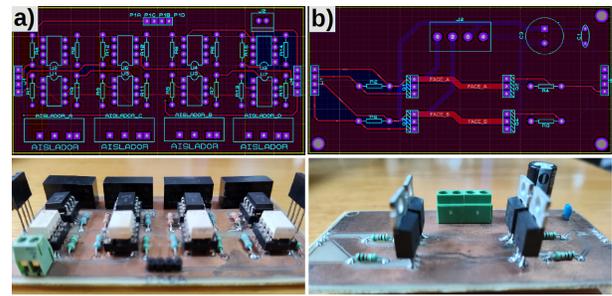


Fig. 10. (a) Sistema electrónico de amplificación y aislamiento, (b) Sistema electrónico de potencia para manufactura sustractiva

una interfaz en Python y una página web dinámica basada en PHP y HTML, en conjunto con un servidor Apache, que recibe los datos enviados por el ESP8266 para visualizarlos, almacenarlos y acceder a los mismos a través de Python.

La interfaz cuenta con un menú de opciones a seleccionar, que no solo realiza la lectura de las variables de los módulos o las cambia, sino que también se tiene la posibilidad de llevar a home al robot, ingresar las coordenadas de inicio del proceso, realizar la manufactura y terminar la misma para llevar nuevamente al robot a su home. Esta comunicación con el robot se logra cargando en el entorno de Python la librería KUKAVARPROXY, con la que se logra establecer un servidor de múltiples clientes para robots KUKA a través de una interfaz de comunicaciones cruzadas. Es importante mencionar que la comunicación inalámbrica del SmartPAD, la computadora central y los módulos deben estar totalmente sincronizadas para obtener manufacturas robustas y de alta calidad.

E. Resultados

1) *Manufactura Aditiva:* En esta primera prueba de concepto del cabezal aditivo, se eligió filamento del tipo PLA, ya que se trabaja a bajas temperaturas y no es necesario contar con una cama caliente para lograr la adherencia del filamento a ella, aunado a tener una gran adherencia, lo que brinda una excelente unión entre capas. Las impresión de las primeras capas fueron las mas desafiantes al iniciar las pruebas, ya que se despegaban o no lograban tener la mejor adherencia desde la primera capa, por lo que se inicio por ajustar la temperatura de impresión hasta tener una adherencia total desde la primera capa a la cama y entre capas. Otro aspecto que fue necesario ajustar es la altura de impresión entre capa y capa, ya que en un inicio, se consideró un espacio de impresión de 0.8 mm, generando que el desfase de altura fuera incrementando entre capa y capa, y ocasionando que las finales no se adherían a la anterior. Por esta razón, la altura se redujo en un inicio a 0.7 mm y finalmente hasta 0.6 mm, con esta última se logro tener mejores resultados de adherencia entre capa y capa. Otra aspecto considerable a mencionar es el tipo de filamento, en las primeras pruebas se utilizó un filamento totalmente liso, causando problemas de retracción del material, por lo que se seleccionó un filamento con ranuras que mejorara este aspecto en la impresión, en la Fig. 12 se muestran alguno de los procesos de impresión 3D realizados y la comparación de

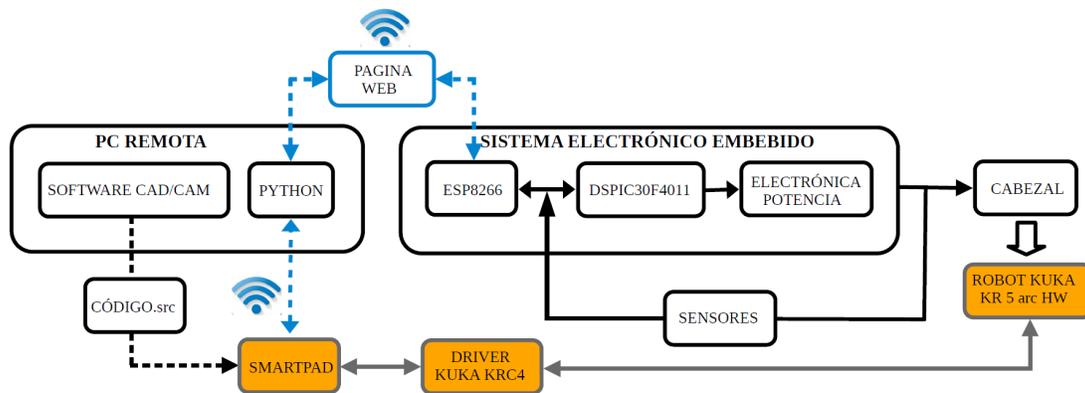


Fig. 11. Diagrama de interconexión al sistema

pruebas de concepto. Es casi seguro que una impresora 3D habría logrado construir una estructura más precisa, pero como ya se mencionó, el objetivo principal de este experimento, no era mostrar la precisión, sino la simplicidad del método y el tamaño de construcción en las piezas.

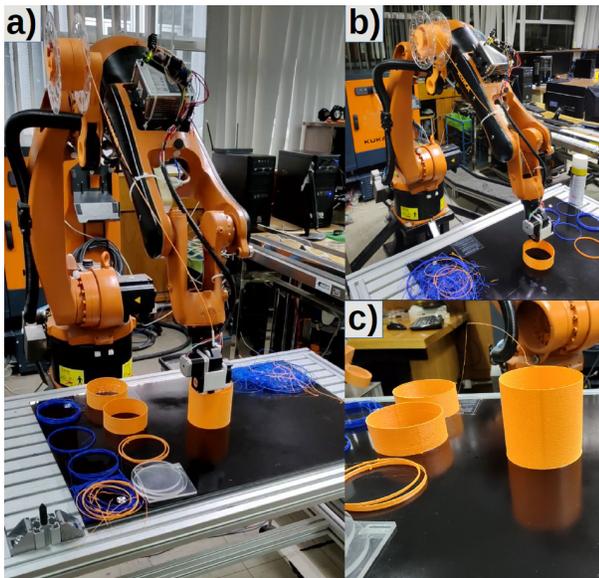


Fig. 12. (a) Impresión de cilindro de 100x100[mm], (b) Impresión de cilindro de 100x40[mm], (c) comparación de los procesos realizados.

2) *Manufactura Sustractiva*: En la prueba de concepto para el cabezal sustractivo, se inició por realizar una búsqueda de posibles materiales a utilizar, eligiendo el acrílico, ya que este es un elemento blando y de fácil adquisición en el mercado, esto en comparación con otros materiales como el aluminio, acero o incluso Nylamid. La placa de acrílico seleccionada para las pruebas iniciales tiene un espesor de 5 [mm], por lo que se procedió a realizar 5 pasadas de un 1 [mm] y una última de 0.5 [mm] para eliminar cualquier posible sobrante de la penúltima pasada y lograr extraer la pieza en su totalidad. Comprobado el correcto funcionamiento del proceso sustractivo en las pruebas ya mencionadas, se procedió a efectuar el corte de una placa de acrílico de 1.8 [mm] de grosor, esto con la finalidad de realizar un proceso de manufactura más completo y exigente para el cabezal.

Considerando que este sería un proceso más riguroso tanto para el robot como para el spindle, se realizaron pasadas de 0.5 [mm] y se aumentó la potencia del cortador, este último parámetro se modificó con la finalidad de mejorar el corte del acrílico, en la Fig. 13 se muestra una imagen del proceso de manufactura sustractiva y los resultados finales. Al igual que en el proceso de manufactura aditiva la finalidad de esta prueba de concepto se centra en mostrar la simplicidad y el volumen de construcción de las piezas. En este sentido, es casi seguro que una máquina CNC lograría realizar un corte más rápido y preciso.

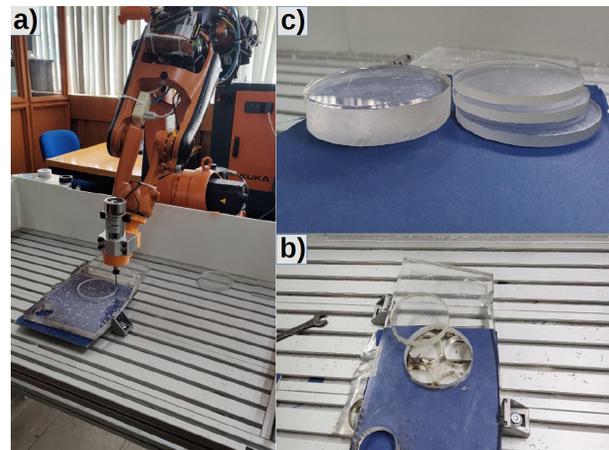


Fig. 13. (a) Proceso de manufactura sustractiva, (b) corte de la placa de acrílico de 18 [mm] de espesor, (c) comparación de los procesos realizados

A continuación en la tabla II se propone establecer un diseño de pruebas de experimentos para pruebas futuras, que exploren los seis grados de libertad que ofrece el brazo robótico, tanto para manufactura aditiva como sustractiva, lo que permitirá establecer los alcances y limitaciones de esta PMHI. Donde se plantea medir elementos como tiempo y volumen, a través de la evaluación de diferentes métricas como periodo de producción, que medirá en cuanto tiempo se produjo la pieza o el flujo de impresión promedio con el que se manufacturan las piezas. Y finalmente realizar una prueba de concepto de una pieza que incluya procesos tanto aditivos como sustractivos, con un cambio rápido de cabezal.

TABLA II
PROPUESTA DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA UNA
INVESTIGACIÓN FUTURA

Diseño de experimentos propuestos para pruebas futuras		
Elemento	Métrica	Propone medir
Tiempo	Periodo de producción	Tiempo de producción de la pieza
		Flujo de impresión promedio o Velocidad de maquinado promedio
Volumen	Tamaño de la pieza	Que dimensiones se lograron establecer
	Mejoras	En cuanto se logro mejorar las dimensiones la pieza

V. CONCLUSIONES

El experimento de prueba de concepto, junto con la revisión del estado del arte presentada en este documento, ha demostrado que el desarrollo de una plataforma que integre procesos de manufactura aditiva y sustractiva en el mismo brazo robótico industrial es realmente posible y se han mostrado las áreas de oportunidad para mejora que deben solucionarse en trabajos futuros. En el trabajo se obtuvieron resultados sustantivos en cuanto a: la forma de manejo del material más indicado, potencias, velocidades, tiempos y capacidades para manufactura de piezas de mayor volumen manufacturadas con un brazo robótico industrial, lo que en sí es ya una contribución para fijar métricas en estos procesos, se demuestra así, la factibilidad de utilizar una plataforma de manufactura híbrida integral en procesos reales de manufactura.

Como trabajo futuro es importante mejorar la optimizar de tiempo y energía al realizar diferentes procesos, por lo que se deberá desarrollar un cabezal giratorio, que permita ensamblar tanto el cabezal aditivo como sustractivo en la brida del robot y alojando así a los dos cabezales en el robot, lo que dará la posibilidad de realizar un cambio rápido de cabezal. Para lo cual también se deberá desarrollar un sistema electrónico que permita activar y desactivar los SEE de ambos módulos. Finalmente complementar la interfaz de usuario, la cual deberá ofrecer la posibilidad de elegir que proceso de manufactura se desea realizar, ya sea aditivo o sustractivo.

AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Electrónica y Automatización para la Industria 4.0 (LEAI4.0) del IIMAS-UNAM por facilitar su equipo e instalaciones para la realización de este trabajo.

REFERENCES

[1] W. Leontief, W. W. Leontief, F. Duchin, *et al.*, *The future impact of automation on workers*. New York: Oxford University Press, 1986.

[2] M. Peña-Cabrera, V. Lomas, and G. Lefranc, "Fourth industrial revolution and its impact on society," in *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.

[3] S. Keating and N. Oxman, "Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 6, pp. 439–448, 2013.

[4] J. A. Saucedo-Martínez, M. Pérez-Lara, J. A. Marmolejo-Saucedo, T. E. Salais-Fierro, and P. Vasant, "Industry 4.0 framework for management and operations: a review," *Journal of ambient intelligence and humanized computing*, vol. 9, pp. 789–801, 2018.

[5] M. Bortolini, E. Ferrari, M. Gamberi, F. Pilati, and M. Faccio, "Assembly system design in the industry 4.0 era: a general framework," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 5700–5705, 2017.

[6] E. Uhlmann, S. Reinkober, and T. Hollerbach, "Energy efficient usage of industrial robots for machining processes," *Procedia CIRP*, vol. 48, pp. 206–211, 2016.

[7] R. Pérez, S. C. Gutiérrez, and R. Zotovic, "A study on robot arm machining: Advance and future challenges.," *Annals of DAAAM & Proceedings*, vol. 29, 2018.

[8] F. Rennung, C. T. Luminosu, and A. Draghici, "Service provision in the framework of industry 4.0," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 221, pp. 372–377, 2016.

[9] O. Rösch and M. Zäh, "Steigerung der arbeitsgenauigkeit von fräsrobotern-höhere genauigkeit durch steuerungstechnische kompensierung der roboter-abdrängung (english: Increasing operational accuracy of milling robots)," *wt Werkstattstechnik online*, vol. 103, no. 9, pp. 686–692, 2013.

[10] M. A. Muktadir, S. M. Ali, S. Kusi-Sarpong, and M. A. A. Shaikh, "Assessing challenges for implementing industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection," *Process safety and environmental protection*, vol. 117, pp. 730–741, 2018.

[11] E. Barnett and C. Gosselin, "Large-scale 3d printing with a cable-suspended robot," *Additive Manufacturing*, vol. 7, pp. 27–44, 2015.

[12] I. Bin Ishak, J. Fisher, and P. Larochelle, "Robot arm platform for additive manufacturing using multi-plane toolpaths," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 50152, p. V05AT07A063, American Society of Mechanical Engineers, 2016.

[13] F. Wulle, D. Coupek, F. Schäffner, A. Verl, F. Oberhofer, and T. Maier, "Workpiece and machine design in additive manufacturing for multi-axis fused deposition modeling," *Procedia Cirp*, vol. 60, pp. 229–234, 2017.

[14] M. Vaezi, S. Chianrabutra, B. Mellor, and S. Yang, "Multiple material additive manufacturing—part 1: a review: this review paper covers a decade of research on multiple material additive manufacturing technologies which can produce complex geometry parts with different materials," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 8, no. 1, pp. 19–50, 2013.

[15] L. D. Evjemo, S. Moe, J. T. Gravdahl, O. Roulet-Dubonnet, L. T. Gellein, V. Br, *et al.*, "Additive manufacturing by robot manipulator: An overview of the state-of-the-art and proof-of-concept results," in *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1–8, IEEE, 2017.

[16] P. Urhal, A. Weightman, C. Diver, and P. Bartolo, "Robot assisted additive manufacturing: A review," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 59, pp. 335–345, 2019.

[17] L. Li, A. Haghghi, and Y. Yang, "A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 33, pp. 150–160, 2018.

[18] KUKA Robotics, *KUKA KR 5 arc HW Specifications*.

[19] Espressif Systems Copyright, *ESP8266 Technical Reference*.

[20] Microchip Technology Inc, *dsPIC30F4011/4012 Data Sheet*.

[21] Allegro Microsystems, *A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection*.



Oscar Molotla Es ingeniero en sistemas electrónicos Industriales por la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM). Tiene una maestría en Ingeniería Eléctrica enfocada en Sistemas Electrónicos por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Actualmente candidato a Doctorado por la misma universidad, enfocándose en Sistemas Electrónicos Embebidos, Industria 4.0 y Celdas de Manufactura.



J. Mario Peña El Dr. Mario Peña-Cabrera, es Ingeniero Mecánico-Electricista con especialidad en el área de Control, Comunicaciones y Electrónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Es Maestro en Ingeniería Electrónica por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y Master of Engineering por McMaster University en Ontario CANADA. Es Doctor en Ciencia y Tecnología por el Posgrado Interinstitucional de Ciencia y Tecnología (PICyT) de SEP-CONACYT-MEXICO con sede en el CIATEQ A.C. (Centro de Tecnología

Avanzada A.C.) y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) y nivel PRIDE "D" de la UNAM. Ha impartido cátedra en la Facultad de Ingeniería de la UNAM a nivel licenciatura, y posgrado. Impartió cursos también en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) en el campus Ciudad de México y actualmente es tutor en el Posgrado de Maestría y Doctorado de Ingeniería Eléctrica de la UNAM. Sus áreas de especialidad son: Visión para Robots, Sistemas Inteligentes de Manufactura, Industria 4.0 e Instrumentación y Automatización. Actualmente pertenece al Departamento de Sistemas Computacionales y Automatización del IIMAS-UNAM y colaboró con el Grupo de Investigación en Mecatrónica y Sistemas Inteligentes de Manufactura del CIATEQ, AC, Centro de Tecnología Avanzada en el estado de Querétaro, México. El Dr. Mario Peña ha presentado sus trabajos de investigación en automatización computarizada y visión para robots en diversos foros nacionales e internacionales, en países como Canadá, Estados Unidos, Korea, China, México, Cuba, Chile, Argentina, Francia, Alemania, Portugal y España, cuenta con más de ciento ochenta publicaciones en el área de su especialidad en revistas internacionales arbitradas, revistas de difusión, reportes técnicos y memorias de congresos internacionales y nacionales y capítulos en libros.



Victor Lomas-Barrie El doctor Victor Lomas estudió la carrera, maestría y doctorado en Ingeniería Electrónica en la UNAM. Realizó una estancia de medio año en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Augsburgo, Alemania. Es investigador de el IIMAS, UNAM. Tiene obra publicada en el tema de hardware reconfigurable y visión robótica. Además ha sido profesor en la Maestría en Ingeniería Eléctrica del Posgrado de la UNAM, en la Maestría de Sistemas Embebidos, INFOTEC y en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Actualmente es el Jefe del

Departamento en Ingeniería en Sistemas Computacionales y Automatización, IIMAS, UNAM. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel I.