

Invernadero Robotizado

Perspectiva de Diseño desde los Sistemas Ciber-Físicos

Ricardo Garro

EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"

INTA

Anguil, Argentina

rgarro@anguil.inta.gov.ar

Leo Ordinez, Omar Alimenti

Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica

Universidad Nacional del Sur – CONICET

Bahía Blanca, Argentina

lordinez@uns.edu.ar, ialimen@criba.edu.ar

Resumen— Los Sistemas Ciber-Físicos (SCF) son una nueva disciplina de investigación que involucra a la ingeniería eléctrica, electrónica, informática, control y comunicaciones interactuando con los procesos físicos. Esto lleva a un dominio de gestión conjunta donde los dos mundos (cibernética y física) deben tenerse en cuenta para decidir las acciones a tomar. Por lo tanto, un aspecto fundamental en el desarrollo de sistemas ciber-físicos es la comprensión del problema, el medio ambiente y de las entidades involucradas. En este sentido, este trabajo presenta el diseño de un invernadero robotizado, que involucra la construcción física del invernadero y de un robot móvil interactuando con el medio físico (recolectando datos y accionando sobre las plantas).

Palabras clave— sistema ciber-físico; diseño; agricultura de precisión; invernadero; robot

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción bajo cubierta o en invernaderos constituyen, en la actualidad y en muchas de las regiones del mundo, un claro exponente de producción intensiva donde se alcanzan importantes niveles de rendimiento. En Argentina la superficie destinada a la producción hortícola en invernaderos es aproximadamente de 5000 ha. Localizada en su mayoría en los cinturones hortícolas de las grandes provincias y ciudades, como por ejemplo Corrientes, Santa Fe, Buenos Aires, La Plata, Mar del Plata, entre otras.

Los datos reflejan que los cultivos bajo cubierta o en invernaderos¹, pertenecen a un sistema altamente productivo con peso creciente dentro del sector agrícola argentino. Una de las principales ventajas productivas de este tipo de instalaciones, se debe a que es posible generar las condiciones climáticas óptimas que permiten cultivar fuera de estación. Lo cual genera un mejor precio de venta debido a que la demanda es más alta y la oferta escasa. Sin embargo, no está exento de problemas. Uno de los más importantes es el control de plagas y de enfermedades, las cuales presentan mayor incidencia que en los cultivos desarrollados al aire libre. En los cultivos de

invernadero este control se realiza generalmente, mediante la aplicación de productos químicos. Si bien en los últimos tiempos se han introducido métodos más amigables con el medio ambiente y menos perjudiciales para la salud de las personas, sigue siendo un desafío la búsqueda de tratamientos optimizados, desde el punto de vista técnico y agronómico [1]

En base a lo anterior, resulta una alternativa adecuada la utilización de un robot móvil, para desarrollar esas tareas tediosas e insalubres. Por otro lado, a pesar de la repetitividad de las tareas a desarrollar y lo controlado del ambiente en el que se trabaja, la construcción de un robot de esas características representa un desafío tecnológico y científico de actualidad. Más aún, la fuerte interacción con el mundo físico y los problemas que ésta involucra requieren de un enfoque multidisciplinario que, por sí solos la teoría de control, los sistemas embebidos de tiempo real, la ingeniería de software, la mecánica y la agronómica no alcanzan a cubrir.

Los Sistemas Ciber-Físicos (SCF) representan una solución apropiada a esta necesidad, ya que proponen una integración de los procesos físicos con los computacionales. Este paradigma es muy reciente [2] y se asienta en otros más clásicos como la teoría de control, los sistemas de tiempo real y las redes de comunicaciones. Sin embargo, los SCF introducen una mirada diferente sobre el sistema a desarrollar. Según Krogh *et al.*[3], los SCF son sistemas en los que el cálculo-procesamiento de la información y los procesos físicos están tan estrechamente integrados, que no es posible determinar si los atributos de comportamiento son el resultado de los cálculos computacionales, las leyes físicas, o ambos. Por otro lado, Lee y Seshia [4] afirman que un SCF es un sistema compuesto por subsistemas físicos junto a computacionales y redes. Estos tres componentes deben incluirse necesariamente en el modelado y diseño del sistema.

En este contexto, el objetivo planteado en este trabajo es presentar el diseño de un invernadero robotizado. Así, las principales entidades involucradas en el sistema son la construcción física invernadero, lo cual involucra sus condiciones ambientales y fitosanitarias; y un robot móvil capaz de recolectar datos ambientales y realizar la aplicación de productos químicos a las plantas. Además, como parte del sistema se incluye un servidor remoto capaz de mantener la información en una base de datos y de comandar en forma manual al robot. De esta manera se puede proyectar el

¹Cabe decir que la función principal de un invernadero es la de recrear y mantener en un espacio específico, diversas condiciones adecuadas y controladas de luz, humedad, temperatura, dióxido de carbono y productos fitosanitarios, entre otras. Sin embargo, dichas condiciones pueden ser potencialmente perjudiciales tanto para los operarios como para el medio ambiente.

desarrollo desde el enfoque de un SCF. Este enfoque incluye el planteo del problema desde la perspectiva conjunta del mundo físico involucrado y los recursos computacionales requeridos; junto con una descripción de aquellos subsistemas necesarios, que surgen del planteo del problema y su correspondiente análisis de requerimientos. Se debe remarcar, que a diferencia de un Sistema Embebido, el cual se enfoca principalmente en los elementos electrónicos y computacionales del sistema a desarrollar; el enfoque de los SCF considera al mundo físico como un co-dominio afectado por las leyes físicas y los procesos computacionales indistinguiblemente. Desde este último punto de vista, el *Invernadero Robotizado* no es un invernadero con un robot, sino que es un sistema más complejo, conformado por la plataforma móvil, el micro-clima del invernadero, las plantas y su distribución física, el servidor remoto, los sistemas de control del móvil, entre otras.

Luego de esta introducción, en la Sección II, se presenta y describe el entorno físico del invernáculo, sus características y desafíos. En la Sección III, se analizan los requerimientos del sistema planteado. El diseño del sistema, se presenta en la Sección IV. En la Sección V, se exponen algunos trabajos relacionados que sirvieron de soporte para la elaboración de este artículo. Se concluye en la Sección VI con algunas consideraciones finales que facilitaran la continuidad del trabajo en sus múltiples líneas de investigación posible.

II. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Un invernadero es típicamente una estructura cuyo techo y laterales son transparentes o translúcidos, lo que permite una calidad y cantidad suficiente de la radiación solar para producir la fotosíntesis en las plantas allí contenidas. Los invernaderos han sido generalmente diseñados para la protección de plantas que se cosechan tanto fuera de estación como no, las cuales no pueden soportar bajas temperaturas o congelamiento, protegiéndolas, sobre todo, del excesivo calor o frío [5]. Existen también en este tipo de ambientes algunas condiciones desfavorables y nocivas para la salud humana, ya sea por las condiciones propias del lugar, como por algunas tareas que se deben realizar en él.

Los equipos que tradicionalmente se han empleado para combatir plagas y enfermedades, y que aún hoy en día se utilizan de forma mayoritaria, son lanzas y pistolas pulverizadoras manuales (equipos de bajo costo, fácil mantenimiento y adecuados para problemas fitosanitarios puntuales). Aunque pueden ir acoplados a una instalación fija de pulverización (red de tuberías distribuida por el invernadero), presentan algunos problemas como: baja eficiencia, dificultad de regulación, pericia del operario; elevados riesgos de contaminación ambiental, pérdidas de producto fitosanitario en el suelo; riesgo para la salud de las personas, etc.

Si bien existen otros equipos técnicamente más avanzados (cañones, instalaciones de nebulización y barras pulverizadoras), una alternativa para la optimización de las tareas fitosanitarias ha sido la aplicación de la robótica. Fundamentalmente la presencia de los operarios en las tareas necesarias en los cultivos bajo cubierta, conlleva una serie de

tareas riesgosas, repetitivas y, de algún modo tediosas, que son susceptibles de ser robotizadas. De allí, la conveniencia de disponer de vehículos con capacidad de desplazamiento autónomo, es decir, sin intervención de seres humanos [6][7][8].

En la actualidad, en algunos lugares del país, diversas actividades de relevamiento, adquisición de datos y manejos del ambiente se realizan de forma tradicional. Como ya se ha mencionado se pueden utilizar mochilas para pulverizar productos fitosanitarios, elementos de medición (*i.e.*, humedad, temperatura, índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI), etc.) y recolección manual. Todas estas herramientas generan un esfuerzo y algunas de ellas un riesgo considerable. En este tipo de tareas, por lo general rutinarias o potencialmente peligrosas para los seres humanos, la idea de utilizar vehículos móviles autónomos es una alternativa adecuada. Lo cual permite la reubicación de las personas fuera de ambientes potencialmente peligrosos y de jornadas inhumanas.

En relación a este contexto, se presenta una alternativa para la construcción de un robot móvil pulverizador para producciones intensivas bajo cubierta. El robot cuenta con una estructura móvil, con un modo de locomoción diferencial. Lo que posibilita realizar una aplicación selectiva de producto fitosanitario, de acuerdo a las necesidades que se presenten, y al tipo de cultivo.

Es importante destacar que la plataforma móvil no trabaja de manera aislada, sino que conforma una red con diferentes dispositivos ubicados en puntos estratégicos del invernáculo, conformando una red de sensores y actuadores inalámbricos (WSANs). Esta idea de trabajo se basa en lo planteado por Stankovic [9], para quien las WSANs, tienen su potencial en la cobertura densa y flexible de una gran extensión de terreno. Además, esta tecnología permite la correlación entre varias WSANs. Estas capacidades se traducirán así en una mejor comprensión de las condiciones ambientales, lo cual es muy beneficioso para un túnel o invernáculo. De esta manera se haría posible la generación de aplicaciones específicas para los cultivos intensivos, en el campo de la agricultura de precisión². Una aplicación donde las condiciones locales pueden dictar el control de las cantidades de plaguicidas y fertilizantes.

La posibilidad de que un invernáculo pueda variar en su configuración interior en cuanto a la cantidad de corredores, platabandas, largo y ancho de las líneas de cultivo, etc.; hace que definir un algoritmo de navegación no sea una tarea sencilla. Por esto, en principio, se abordará la posibilidad de realizar la navegación con mapas previamente establecidos, incluyendo la posibilidad de un telecomando manual. Sin embargo, se plantea en el diseño la posibilidad de incluir en un futuro una navegación autónoma mediante un sistema más complejo. Uno de los objetivos futuros es utilizar los módulos Zigbee para triangular la posición del robot móvil, mediante la medición de la intensidad de la señal inalámbrica [11].

² Se define la agricultura de precisión como un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos), en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola [10].

III. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

En el contexto explicado en el apartado anterior, se observa la necesidad de afrontar el diseño del robot pulverizador desde la perspectiva de los SCF. Como se mencionó anteriormente, estos sistemas representan integraciones muy fuertes de los procesos físicos con los computacionales [12][3]

Dicha integración es evidente en este caso, debido a que las variables físicas, que se deben manejar, están estrechamente relacionadas con el software y el hardware. A tal punto se da esta convivencia entre procesos físicos y computacionales, que para un observador externo es difícil determinar si las condiciones ambientales y fitosanitarias del invernadero se dan por causas naturales o por la afectación realizada por el sistema computacional. Dicho de otro modo, resulta imposible discernir el proceso físico medioambiental del computacional, ya que ambos conforman el *invernadero*, haciendo difícil establecer donde finaliza uno y comienza el otro.

El análisis de requerimientos tiene que ver con la comprensión del problema [13]. Para el caso particular de los SCF, el análisis de requerimientos está dado principalmente por la determinación de los procesos físicos involucrados, la identificación de sus variables y el establecimiento de las relaciones entre dichas variables; así como por su interacción con los aspectos computacionales (hardware y software asociado). En esta sección se identifican las variables que serán relevadas y utilizadas por el sistema ciber-físico, tanto para el monitoreo específico del invernáculo, como para la plataforma móvil.

A. Variables Ambientales del Invernadero

- ! Humedad
- ! Temperatura
- ! Radiación

Estas tres variables son de gran utilidad para el personal especializado que gestiona el invernáculo, debido a que con ellas se pueden realizar inferencias en cuanto a comportamiento y evolución de los diferentes cultivos.

B. Variables del Robot

- ! Posición
- ! Velocidad
- ! Aceleración
- ! Distancia a otros objetos
- ! Potencia eléctrica
- ! Presión
- ! Caudal
- ! Potencia de señal Zigbee

Este conjunto de variables son las que permitirán al robot móvil, recorrer el invernáculo de manera controlada y realizar las tareas programadas. Tanto las de pulverización de producto fitosanitario, como las propias de la navegación por el interior de las instalaciones. En este último aspecto aparecen otro tipo de restricciones propias de los sistemas no holonómicos³ como es el caso del robot con un modelo de locomoción diferencial.

³ Un robot no holonómico es aquel que no puede cambiar su dirección instantáneamente, sin necesidad de rotar previamente. En este caso un robot

C. Síntesis de Requerimientos

En base a las variables presentadas anteriormente y a los requerimientos funcionales y no funcionales, propios del SCF, se sintetizan las siguientes características a tener en cuenta al momento de la etapa de diseño: movimiento, sensado y posicionamiento fijos, interfaz H-M remota, comunicación, pulverización, visión y captura de imágenes, coordinación general, cálculo y seguimiento de trayectorias.

IV. DISEÑO DEL SISTEMA

Se ha elegido representar el diseño arquitectónico del sistema por medio de Diagramas de Despliegue del Lenguaje Unificado de Modelado (UML) [14]. En la Figura 1, se puede apreciar como está compuesto el SCF constituido por la plataforma móvil (robot) y la red de sensores y actuadores (WSAN). Este diagrama permite tener una concepción acabada del sistema y de sus subsistemas, así como las relaciones entre sus componentes, tanto a nivel de hardware como de software.

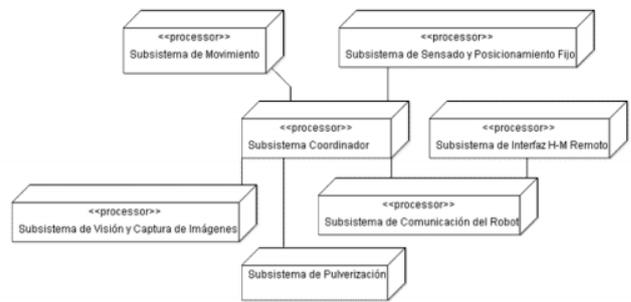


Figura 1. Diagrama de despliegue del sistema completo.

De acuerdo a los requerimientos sintetizados en la sección anterior, a continuación se enumeran y describen los subsistemas que componen el SCF del invernadero.

A. Subsistema de Movimiento

Este subsistema (ver Figura 2) es el encargado de adquirir variables de posición relativa y absoluta mediante la lectura de diferentes sensores; así como de accionar los motores que determinan el movimiento.

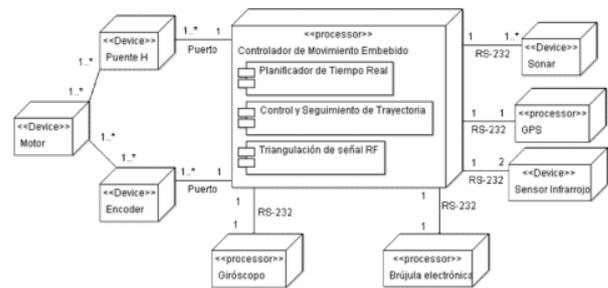


Figura 2. Diagrama de despliegue del subsistema de movimiento.

con dirección diferencial, no puede moverse hacia la izquierda o la derecha de manera instantánea. Lo realiza rotando hacia un lado u otro según la velocidad de sus ruedas.

Una de las tareas más importantes que debe ser llevada adelante por este subsistema es la de interrogar, con la frecuencia establecida por el planificador de tiempo real, los diferentes sensores. Estos datos son enviados al coordinador central el cual realiza los cálculos de trayectoria. Con los datos devueltos se ejecutan el algoritmo de control y seguimiento de trayectoria. El seguimiento de la trayectoria se logra actuando con una señal de control sobre los Puentes H, indicando la dirección e intensidad de rotación de cada motor de manera individual.

Finalmente este subsistema es responsable de realizar la triangulación y definición de la posición relativa de acuerdo a las mediciones de potencia de la señal Zigbee, con respecto a los diferentes módulos de posicionamiento fijo distribuidos dentro de las instalaciones.

B. Subsistema de Sensado y Posicionamiento Fijo

Este módulo (ver Figura 3) es el encargado de medir datos de humedad, temperatura y radiación en puntos estratégicos del invernáculo. La información recolectada es enviada, por medio del módulo Zigbee, a una base de datos.

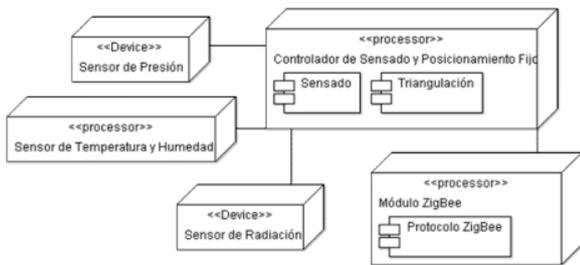


Figura 3. Diagrama de despliegue del subsistema de sensado fijo.

Debido a que la plataforma móvil también posee un módulo Zigbee, se puede triangular su posición relativa con respecto a los demás módulos fijos, ubicados en el invernáculo. Esto se logra midiendo la potencia de la señal entre los diferentes módulos Zigbee.

C. Subsistema de Interfaz H-M Remoto

Este subsistema compuesto por un servidor y un módulo de comunicación Zigbee, son los encargados de posibilitar que el robot sea operado manualmente de manera remota. En este caso la percepción del entorno, y planificación de trayectorias, queda a cargo del usuario. De todas maneras el robot posee mecanismos para alertar ante cualquier posible inconveniente de operación. A su vez este subsistema procesa la información enviada por el robot, la que le dará al usuario final una mirada exhaustiva y cuantificada de las variables ambientales del invernáculo y de la plataforma móvil. Finalmente permitirá sacar conclusiones y realizar inferencias en la manera de proceder técnicamente. El Diagrama de Despliegue correspondiente a este subsistema se muestra en la Figura 4.

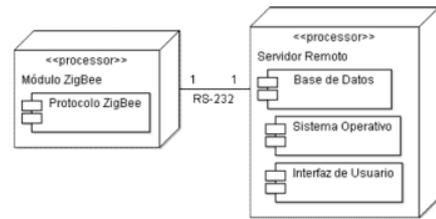


Figura 4. Diagrama de despliegue del subsistema remoto.

D. Subsistema de Comunicación del Robot

Se encarga de posibilitar la comunicación del robot móvil con el servidor remoto y los diferentes módulos fijos. Gracias a este subsistema se pueden almacenar los datos recolectados por el robot y, a la vez, operar la plataforma remotamente de manera manual. Este subsistema se compone principalmente de un transmisor Zigbee, Figura 5.

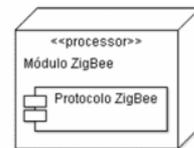


Figura 5. Diagrama de despliegue del subsistema de comunicación móvil.

E. Subsistema de Pulverización

Se encarga de llevar adelante el proceso de pulverización, en el cual es importante tener controladas las variables de presión y caudal del fluido, debido a que cambios abruptos en sus valores pueden ocasionar roturas del equipamiento. Otra variable a tener en cuenta es la temperatura ambiente, debido a que ésta influye directamente sobre la evapotranspiración del producto y debe ser considerada al momento de realizar alguna aplicación del mismo. Finalmente este subsistema también se encarga de activar y desactivar las electroválvulas que hacen la aplicación de manera selectiva, de acuerdo a la configuración espacial del invernáculo (i.e., cantidad de pasillos, platabandas, etc.). El Diagrama de Despliegue de este subsistema se muestra en la Figura 6.

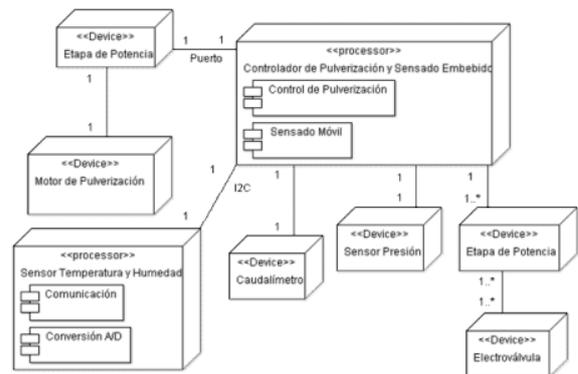


Figura 6. Diagrama de despliegue del subsistema de pulverización.

F. *Subsistema de Visión y Captura de Imágenes*

La Figura 7 muestra el subsistema encargado de obtener y procesar imágenes del entorno, con el objetivo de determinar las características vegetales en los cultivos, utilizando el rango visible del espectro electromagnético como elemento clasificador. En un futuro, también se pretende utilizar esta cámara para dotar al sistema de visión artificial y así reducir el nivel de incertidumbre de los algoritmos de trayectorias dentro del invernáculo.



Figura 7. Diagrama de despliegue del subsistema de visión.

G. *Subsistema Coordinador*

Este subsistema (ver Figura 8) es el corazón del robot móvil. Está encargado de coordinar todas las actividades por medio del planificador de tiempo real, el cual otorga diferentes prioridades a cada tarea de acuerdo a su criticidad y a la manera en que ella puede impactar, en el sistema general, ante una eventual falla.

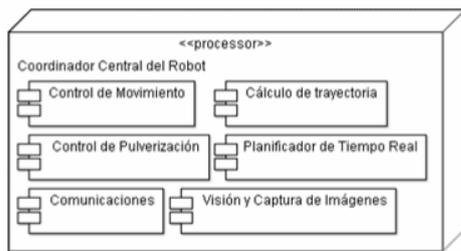


Figura 8. Diagrama de despliegue del subsistema coordinador del robot.

Todas las mediciones obtenidas y procesadas por los demás subsistemas son enviadas al controlador central de la plataforma, quien debe realizar los cálculos de posición, evasión de obstáculos, control de movimiento, control de pulverización, entre otras. Una vez procesada la información, los datos son devueltos al subsistema que generó la petición para que sean tomadas las acciones de control necesarias. Asimismo, este subsistema es el encargado de enviar los datos recolectados al servidor central para que sean procesados y almacenados en la base de datos.

V. TRABAJOS RELACIONADOS

Nuevas tecnologías de la información, comunicación y técnicas de control se han incorporado y se introducen progresivamente al sector agroindustrial (principalmente las relacionadas con la automática y la robótica). El objetivo es, entre otros, facilitar y promover el desempeño eficiente de los distintos sistemas que constituyen un entorno automatizado. Tecnologías y técnicas que, a menudo, son importadas y no se ajustan de forma adecuada a un contexto/escenario productivo

específico. Por lo tanto, requieren de ajustes y adaptaciones a problemáticas locales-regionales específicas. Es por este motivo que se presentan a continuación algunas aplicaciones de robótica desarrolladas para el sector agroindustrial en lo que respecta a la agricultura intensiva, concretamente en invernáculos. Lo que servirá de insumo para analizar experiencias y determinar cómo se pueden adaptar los desarrollos de la robótica a las necesidades socio-económicas productivas locales.

Uno de esos ejemplos es un robot móvil llamado *AURORA*, financiado por el Instituto de Fomento de Andalucía. Este proyecto ha sido realizado en el ámbito de la Red Andaluza de Automática Avanzada y Robótica que agrupa a los departamentos de ingeniería de sistemas y automática de Málaga y Sevilla. El proyecto *AURORA* ha sido concebido para sustituir los trabajos que implican riesgos para la salud dentro de invernaderos, por medio de un robot móvil autónomo. El robot posee así diversos dispositivos de inspección y operación [15].

Otro ejemplo es el de la Universidad de Almería, donde se ha desarrollado una plataforma móvil autónoma denominada *Fitorobot*. En este caso, la plataforma permite desplazarse entre las líneas de cultivo para realizar, en una fase inicial, aplicaciones fitosanitarias mediante el empleo de una barra pulverizadora vertical. También, se han diseñado otros accesorios para aplicaciones futuras como un elevador para trabajos en la parte superior de las plantas (podas, recolección, polinización manual, etc.), y una carretilla para transporte de cargas pesadas [8] [6].

En el mismo sentido, se desarrollaron trabajos de investigación en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de Computación e Informática y el Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto Tecnológico de Massachusetts [16]. Allí se realizó la implementación de un sistema distribuido de jardinería autónoma donde el jardín se constituye en una red entre los robots y las plantas. Los robots "jardineros" son móviles y poseen un brazo robótico del cual se sostiene una cámara. Además, son capaces de ubicar las plantas, y regarlas según sea necesario. También pueden localizar y recoger las frutas. Las plantas en maceta son tomates cherry, y se utilizan sensores para monitorear su bienestar (e.g., la humedad del suelo y el estado de las frutas). Por medio de las redes se presentan las solicitudes de servicio a los robots, se asignan tareas de detección y manipulación.

VI. CONCLUSIONES

Contemporáneamente, el conocimiento fundamentado en la información es más que el conjunto de especialistas o de disciplinas que trabajan en equipos sobre problemas específicos. Las soluciones potenciales implican la integración de diferentes habilidades y la construcción de marcos de conocimientos que se valen y van más allá de los campos disciplinares. Apelan, fundamentalmente, a la convergencia tecnológica.

El valor agregado en la incorporación de tecnologías para mejorar la producción agropecuaria es optimizar el manejo de recursos y la recolección de datos con su correspondiente mayor y mejor capacidad de respuesta. Además, hace eficiente

su gestión, protege a los seres humanos con la reubicación desde sus lugares de trabajo y sustitución de tareas que pueden resultar riesgosas para su salud. Por lo tanto, podría decirse que mejora la calidad de vida de los productores y actores sociales involucrados.

Una alternativa viable para lograr el propósito expresado en el párrafo precedente, es abordar la problemática desde la idea conceptual que proporcionan los SCF. En particular, este trabajo intenta realizar un aporte en ese sentido.

Desde la perspectiva de los SCF, en un determinado sistema no se distinguen las partes físicas, biológicas y estructurales de aquellas electrónicas, mecánicas y computacionales. La integración se da de tal modo que el entorno físico se convierte en un co-domino afectado por las leyes físicas y los procesos computacionales.

Este trabajo específicamente presenta el diseño de un invernadero robotizado, desde el enfoque de los SCF. En este sentido, se considera al conjunto ecosistema-invernadero y al robot móvil como un único sistema. En base a esto se identificaron los principales requerimientos del sistema, en términos de las variables físicas involucradas. Luego, a partir de dichas variables se establecieron los subsistemas necesarios para satisfacer los requerimientos. Finalmente, estos subsistemas se caracterizaron y describieron mediante Diagramas de Despliegue de UML.

Como trabajos futuros, se plantea continuar detallando las características del sistema Invernadero Robotizado, mediante las experiencias recogidas de su implementación práctica. Asimismo, con el objetivo de generalizar los resultados hallados, se pretende tomar el enfoque de Patrones de Diseño para describir las soluciones encontradas a los diversos problemas que se presenten. De este modo, se adaptarán patrones clásicos y se generarán nuevos, de acuerdo a las particularidades que se presenten.

VII. REFERENCIAS

- [1] J. SÁNCHEZ-HERMOSILLA, A. S. G. LÓPEZ, y Y. R. M. ANZANO, «Equipos de aplicación de productos fitosanitarios en invernadero», *Horticultura global*, págs. 26–31, 2007.
- [2] L. Sha, S. Gopalakrishnan, X. Liu, y Q. Wang, «Cyber-physical systems: A new frontier», *Machine Learning in Cyber Trust*, págs. 3–13, 2009.
- [3] B. H. Krogh et al., *Cyber-Physical Systems, Executive Summary*. CPS Steering Group, Washington DC, March, 2008.
- [4] E. A. Lee y S. A. Seshia, *Introduction to Embedded Systems-A Cyber-Physical Systems Approach*. Lee & Seshia, 2010.
- [5] «Enciclopedia Británica <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/9620/agricultural-technology/67808/Greenhouses>», 2011.
- [6] R. G. Sánchez, F. R. Díaz, J. S. H. López, y J. G. Donaire, «Algoritmo de navegación reactiva de robots móviles para tareas bajo invernadero».
- [7] A. O. Baturone, *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2001.
- [8] R. González, F. Rodríguez, J. Sánchez-Hermosilla, y J. G. Donaire, «Experiencias en sistemas de navegación de robots móviles para tareas en invernadero».
- [9] J. A. Stankovic, «When sensor and actuator networks cover the world», *ETRI journal*, vol. 30, n.º. 5, págs. 627–633, 2008.
- [10] *AGRICULTURA DE PRECISIÓN: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*, PROCISUR. Montevideo, UY: , 2006.
- [11] W. H. Kuo, Y. S. Chen, G. T. Jen, y T. W. Lu, «An intelligent positioning approach: RSSI-based indoor and outdoor localization scheme in Zigbee networks», in *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2010 International Conference on*, vol. 6, págs. 2754–2759.
- [12] E. A. Lee, «Cyber-physical systems-are computing foundations adequate», in *Position Paper for NSF Workshop On Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap*, 2006, vol. 1, págs. 1–9.
- [13] B. H. C. Cheng y J. M. Atlee, «Research directions in requirements engineering», in *2007 Future of Software Engineering*, 2007, págs. 285–303.
- [14] «Lenguaje Unificado de Modelado, <http://www.uml.org>».
- [15] A. Mandow, J. L. Martínez, V. F. Muñoz, A. Ollero, y A. García-Cerezo, «The autonomous mobile robot AURORA for greenhouse operation», *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 3, n.º. 4, págs. 18–28, 2002.
- [16] N. Correll et al., «Building a distributed robot garden», in *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, 2009, págs. 1509–1516.